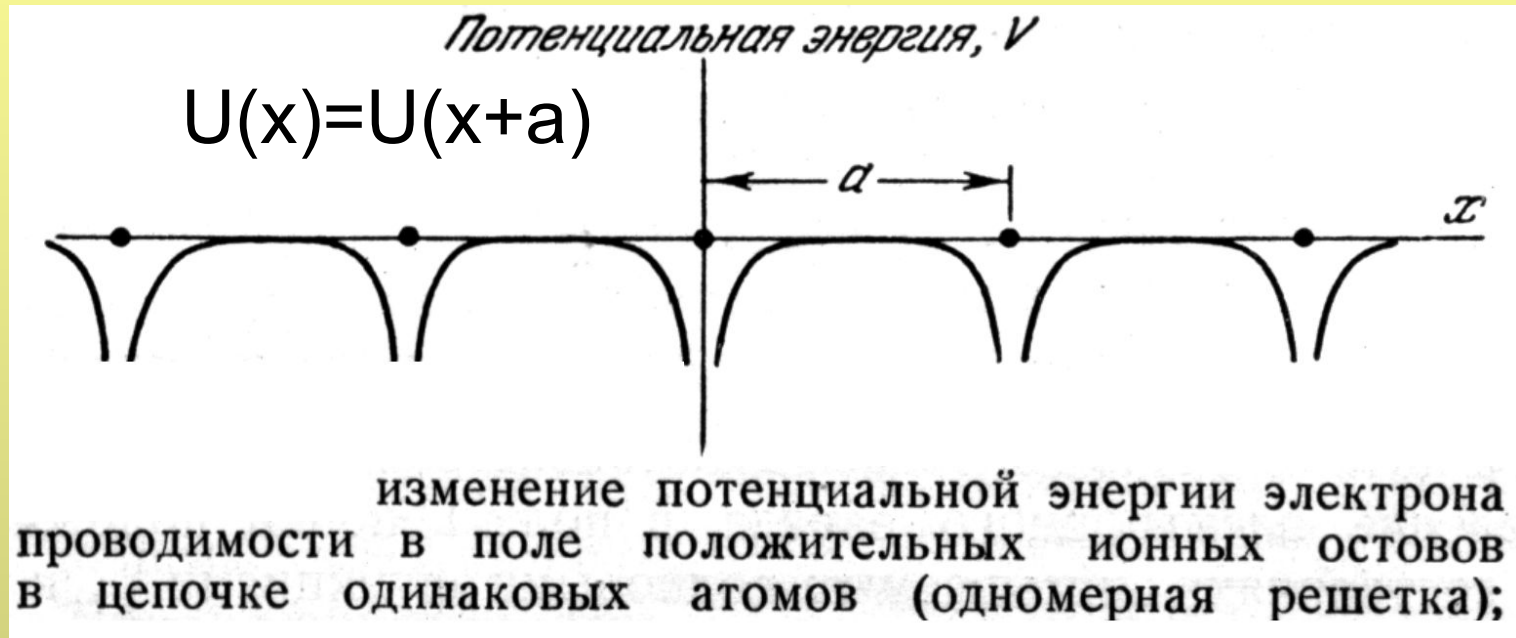


# Источники оптического импульсного когерентного излучения для информационных систем II

- Полупроводниковые лазеры

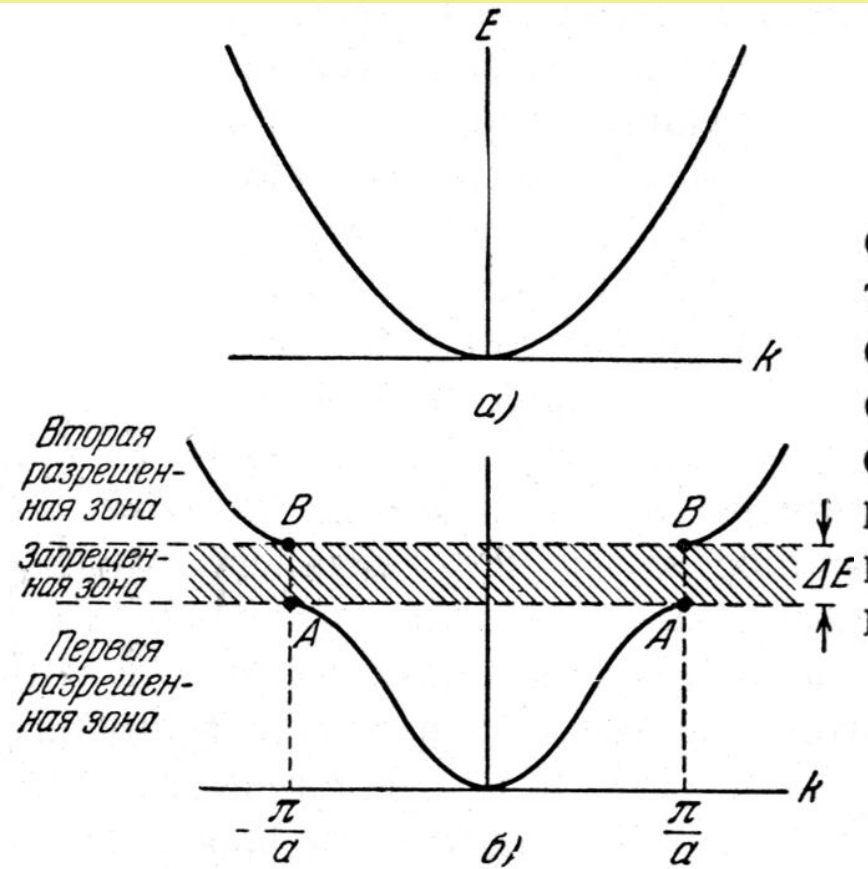
# Основные свойства полупроводников



$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla^2 \psi + U\psi = E\psi \quad \psi(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})u_k(\mathbf{r})$$

$$u_k(\mathbf{r}) = u_k(\mathbf{r} + \mathbf{a}) \quad \mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{\hbar}$$

# Образование запрещенной зоны

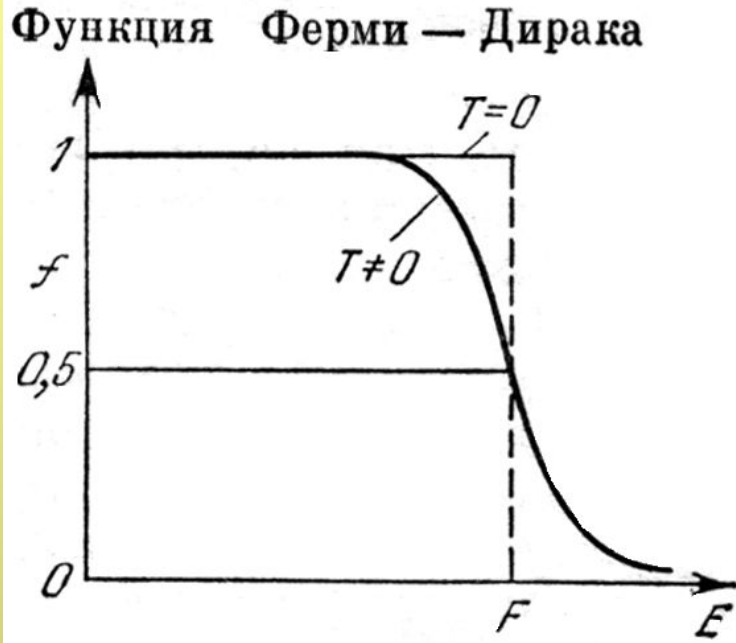


$a$  — график зависимости энергии от волнового числа для свободного электрона;  $б$  — график зависимости энергии от волнового вектора для цепочки из одинаковых атомов (линейная решетка) с расстоянием между атомами (постоянной решетки), равным  $a$ . Показана энергетическая щель, обусловленная первым брэгговским отражением при  $k = \pm \pi/a$ .

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$k \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} \quad d \rightarrow a$$

# Зонная структура полупроводников

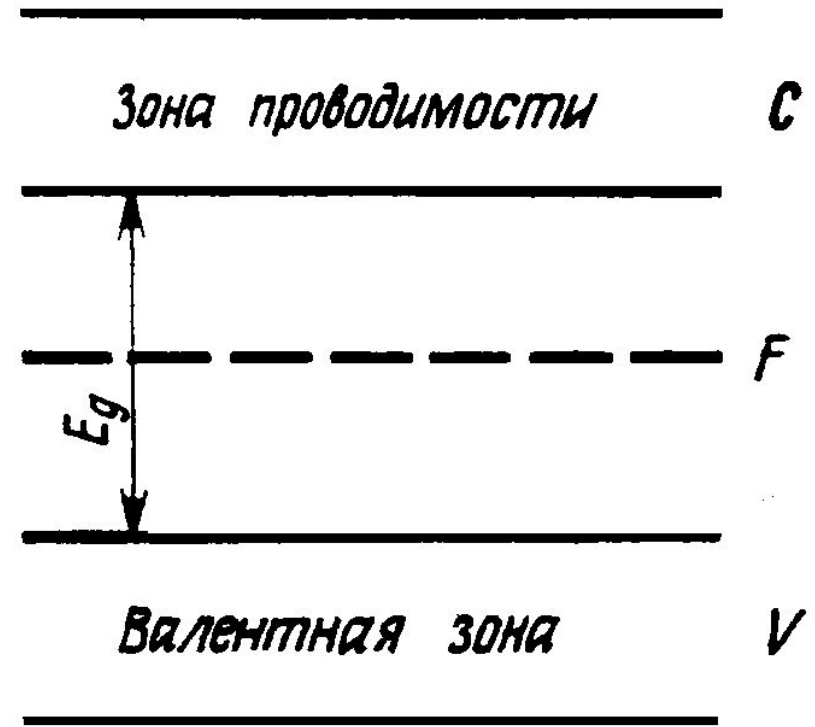


Статистика Ферми-Дирака  
Распределение вероятности заполнения  $f(E)$  состояния с энергией  $E$

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}$$

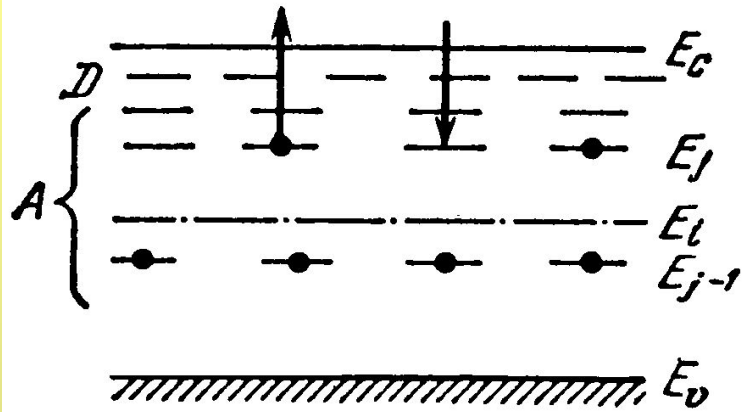
$$f = 1 \quad \text{при} \quad E < F$$

$$f = 0 \quad \text{при} \quad E > F$$

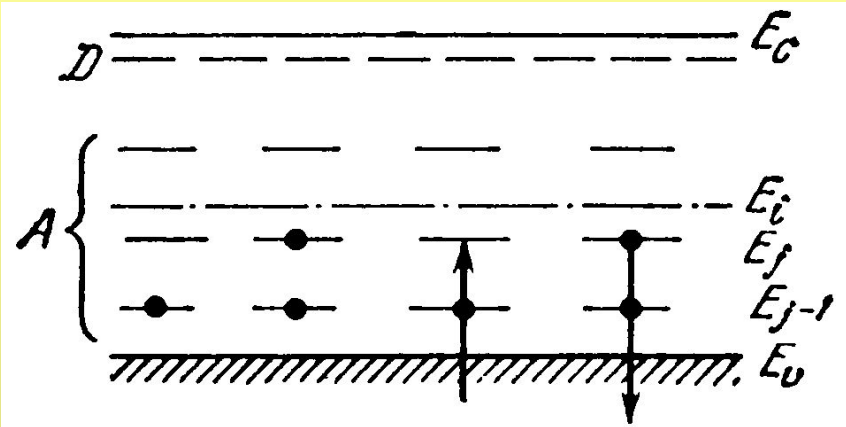


Валентная зона ( $V$ ), зона проводимости ( $C$ ) и уровень Ферми ( $F$ ) в полупроводнике.

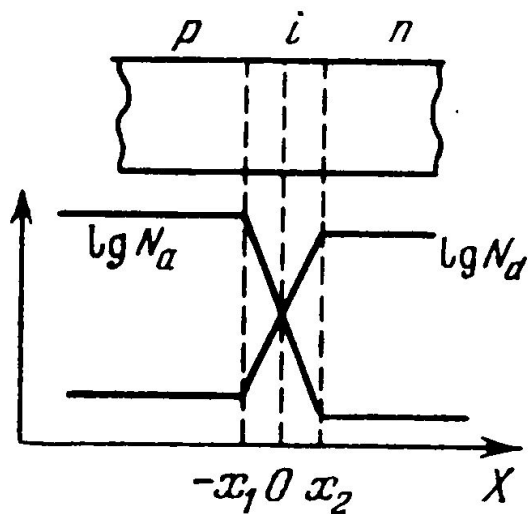
# Полупроводниковый диод



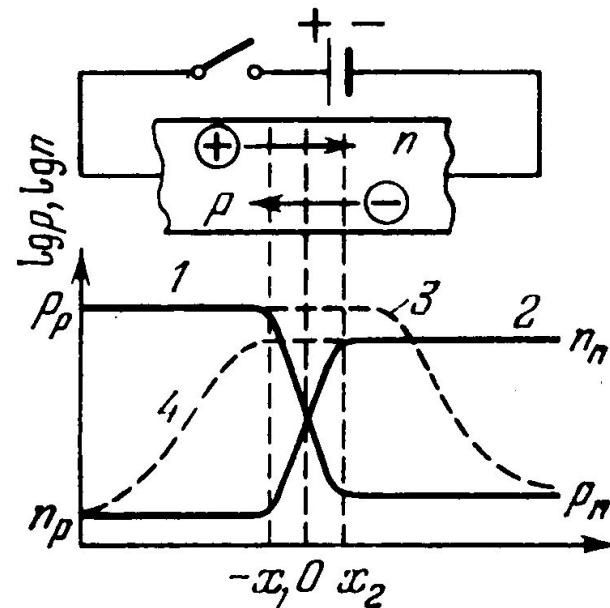
Частично компенсированные многозарядные акцепторы. Полупроводник *n*-типа



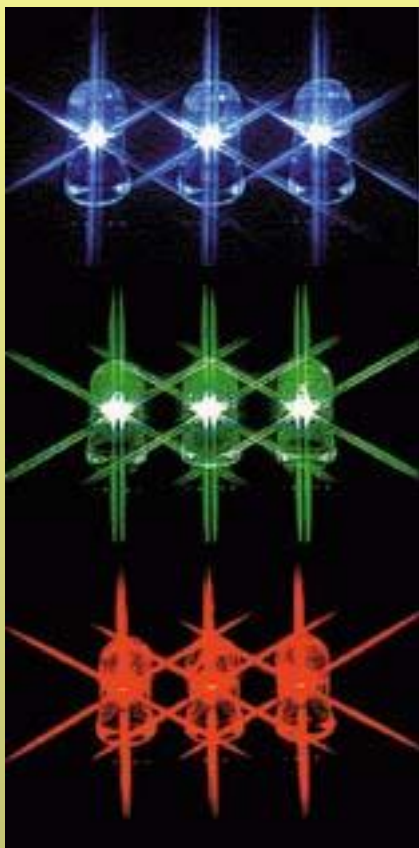
Частично компенсированные многозарядные акцепторы. Полупроводник *p*-типа



*p* — *n*-переход

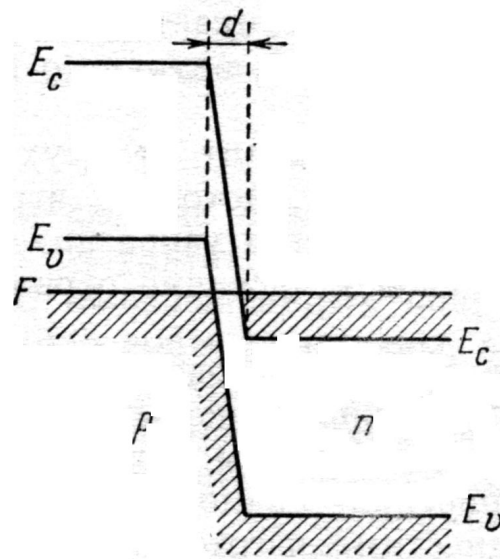
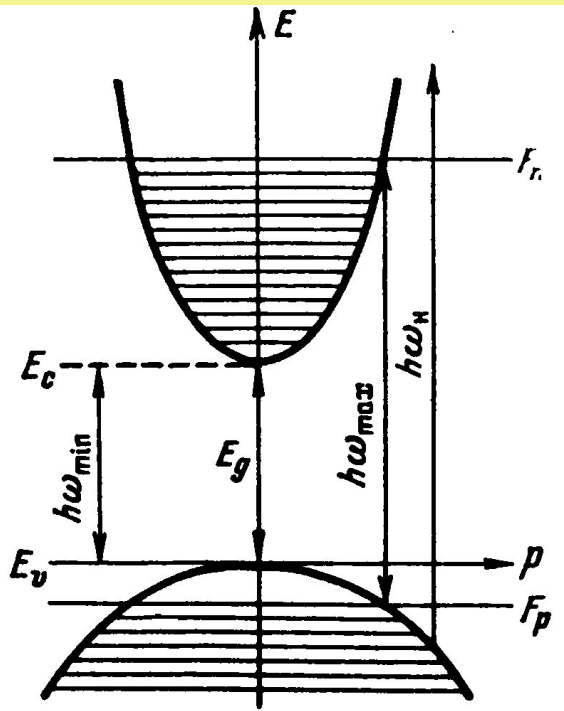


Инжекция в *p* — *n*-переходе

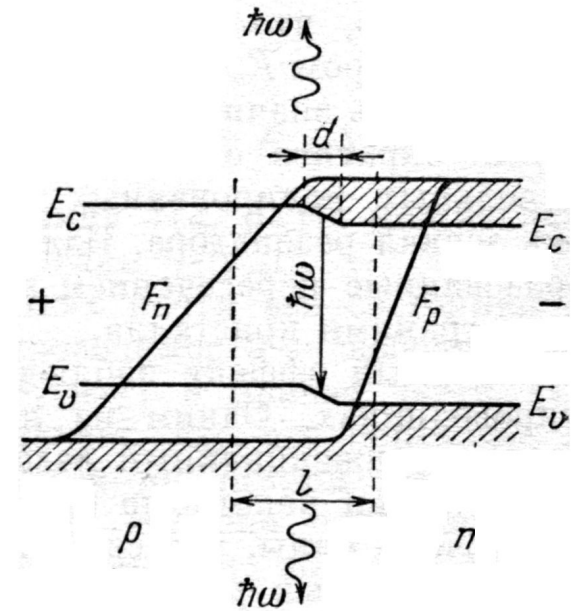


# Светодиоды

# Простейший полупроводниковый лазер



a



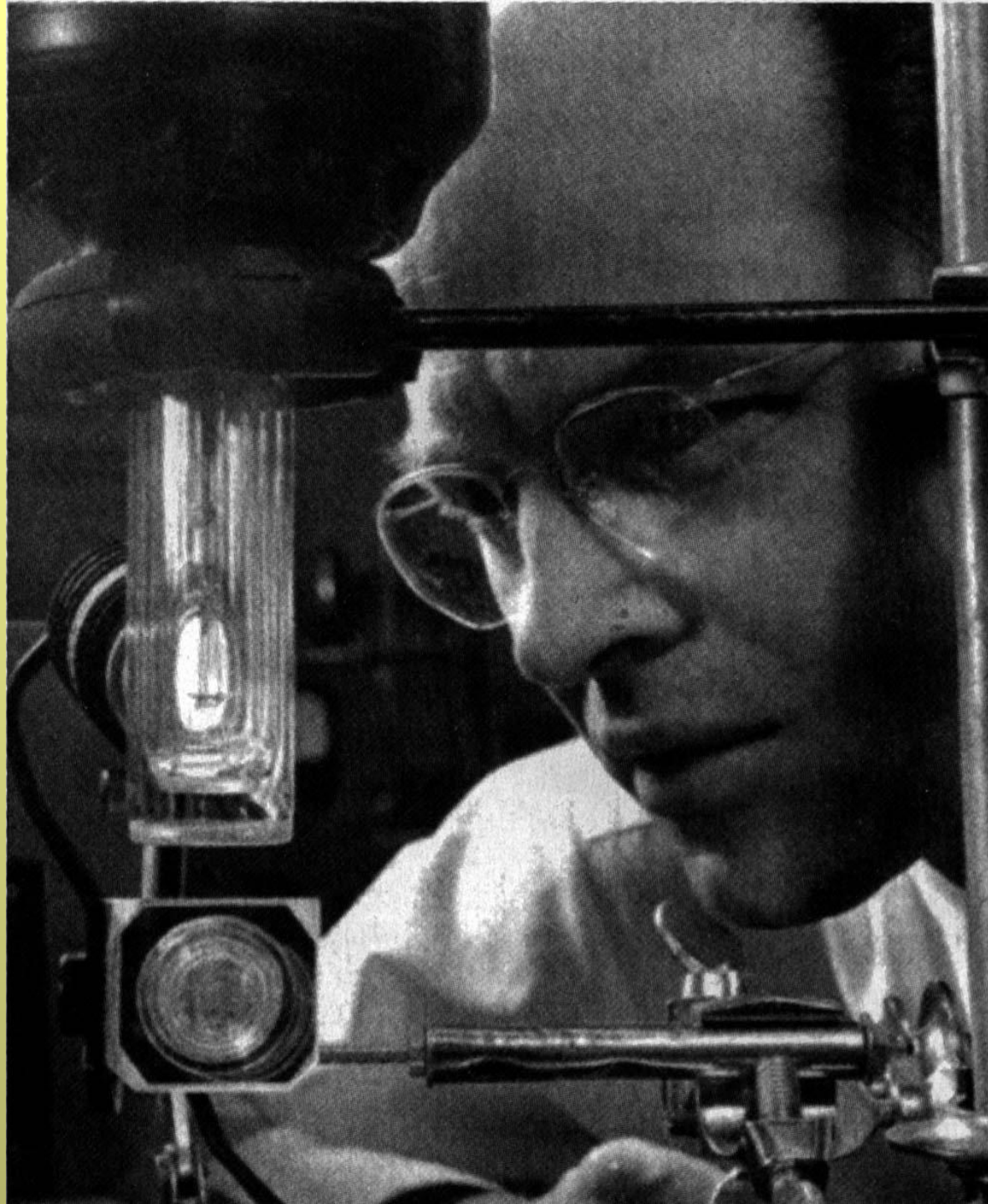
b

Инверсное распределение электронов в однодолинном полупроводнике

Энергетическая диаграмма инжекционного полупроводникового лазера. a — Вырожденный  $p$  —  $n$ -переход без внешнего напряжения, б — Вырожденный  $p$  —  $n$ -переход при положительном напряжении,  $d$  — технологическая ширина перехода,  $l$  — ширина активной области ( $F_n - F_p \geq F_g$ )

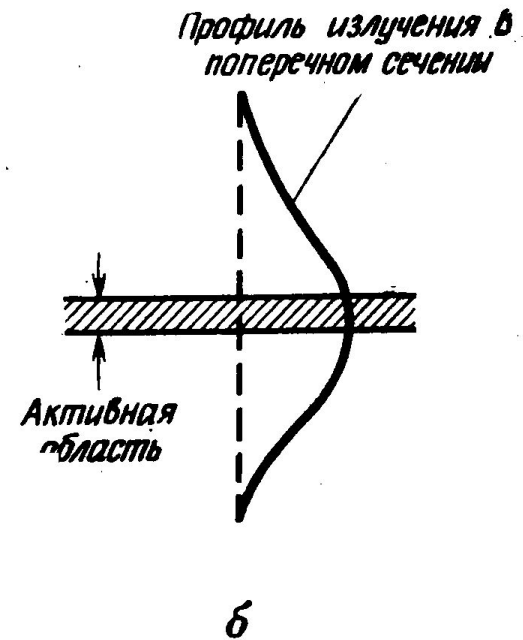
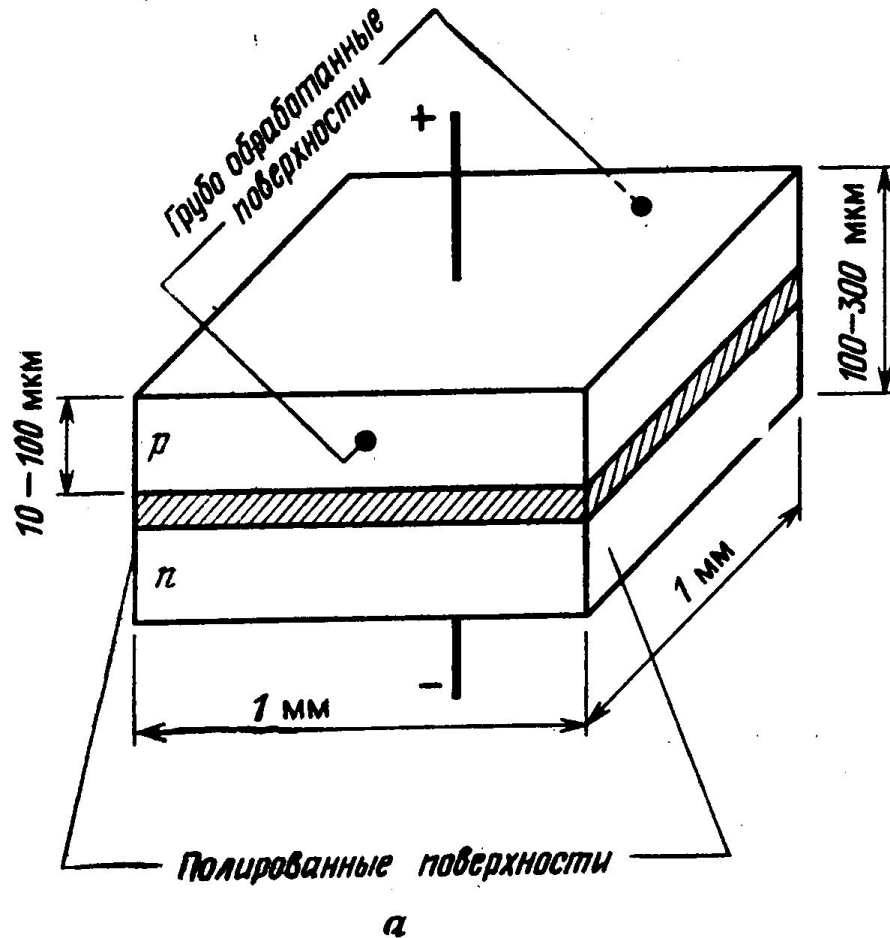


Роберт  
Холл и  
первый  
GaAs  
лазер

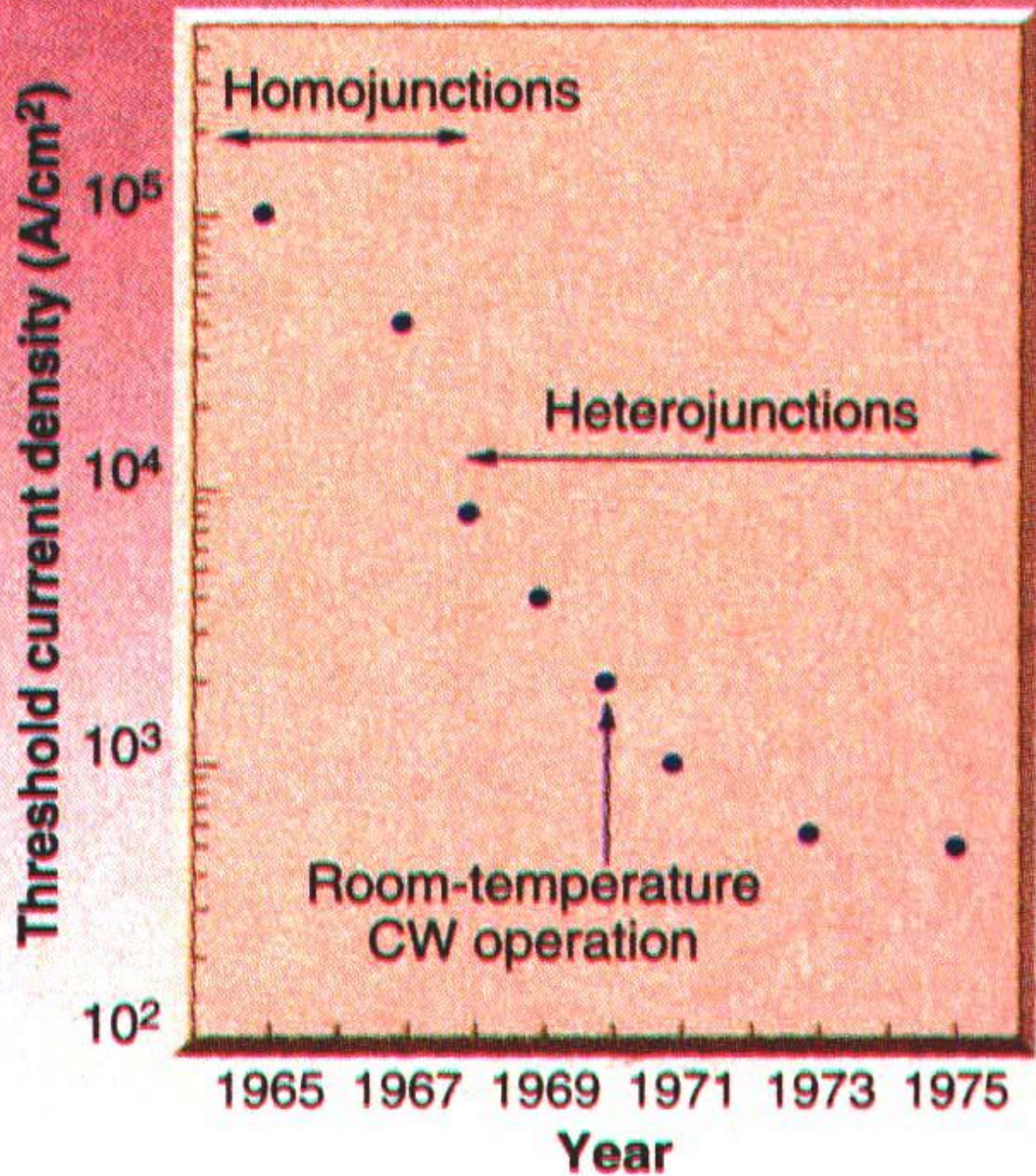




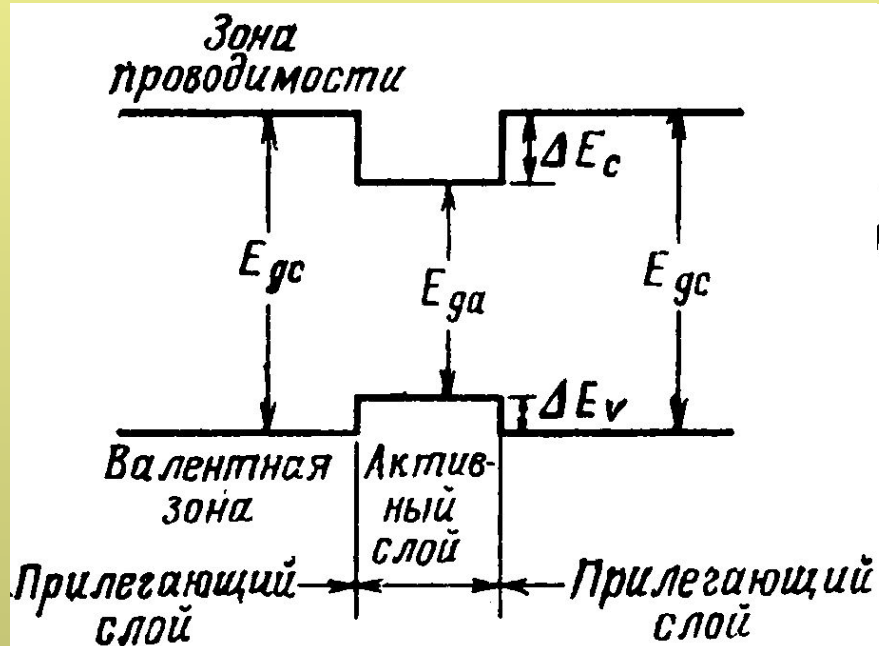
# Простейший полупроводниковый лазер



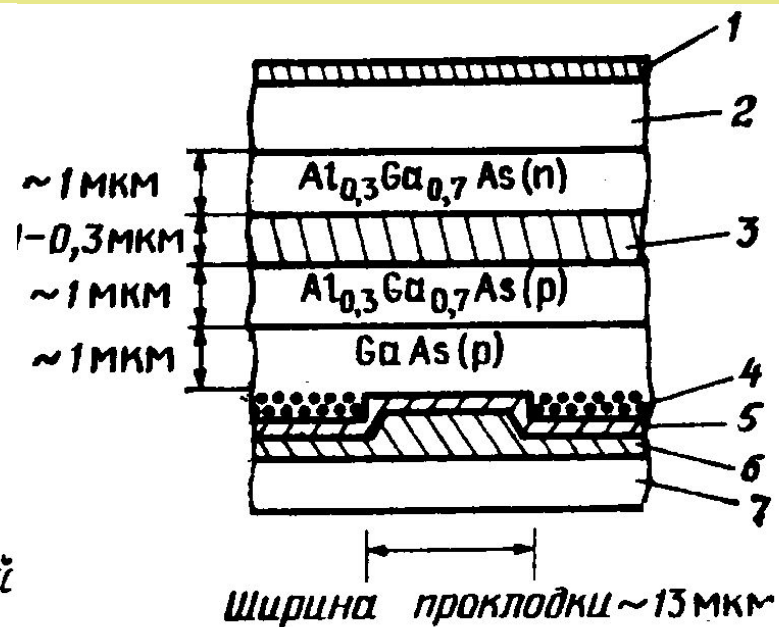
*а* — схема устройства полупроводникового лазера; *б* — распределение интенсивности излучения лазера в поперечном сечении.



# Полупроводниковые лазеры с гетероструктурами

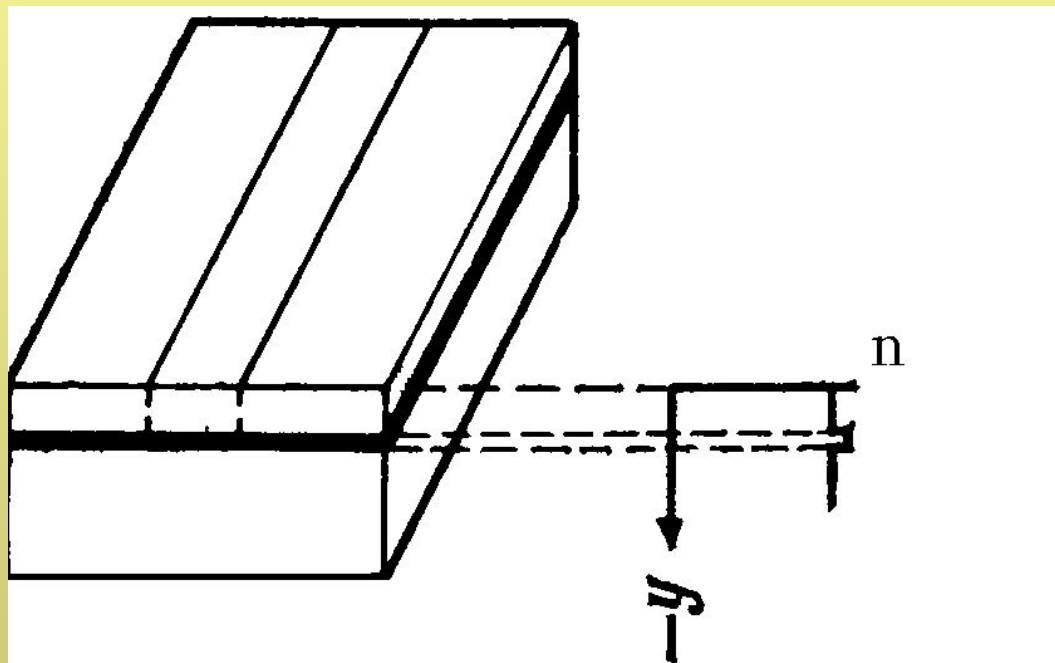


Удержание носителей в двойной гетероструктуре.

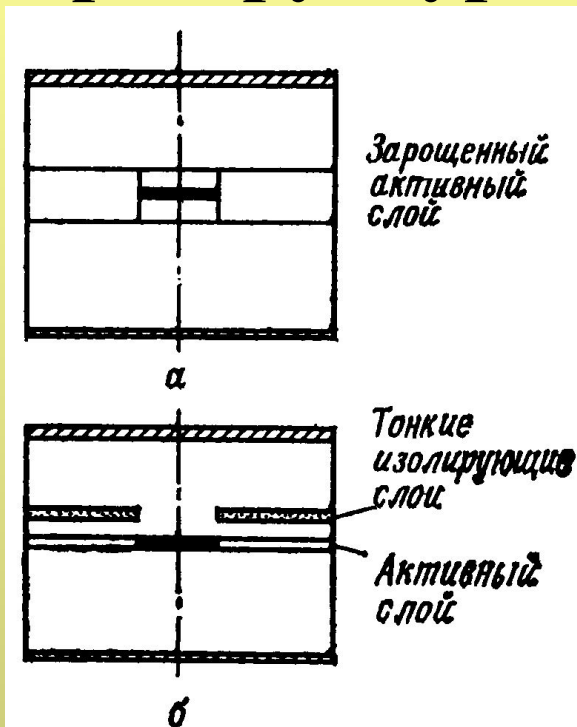




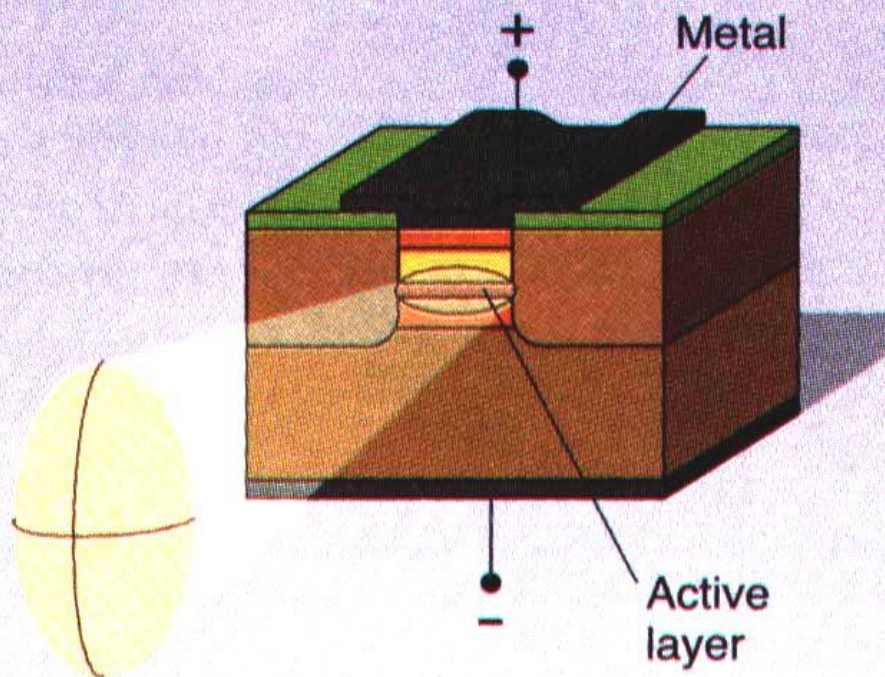
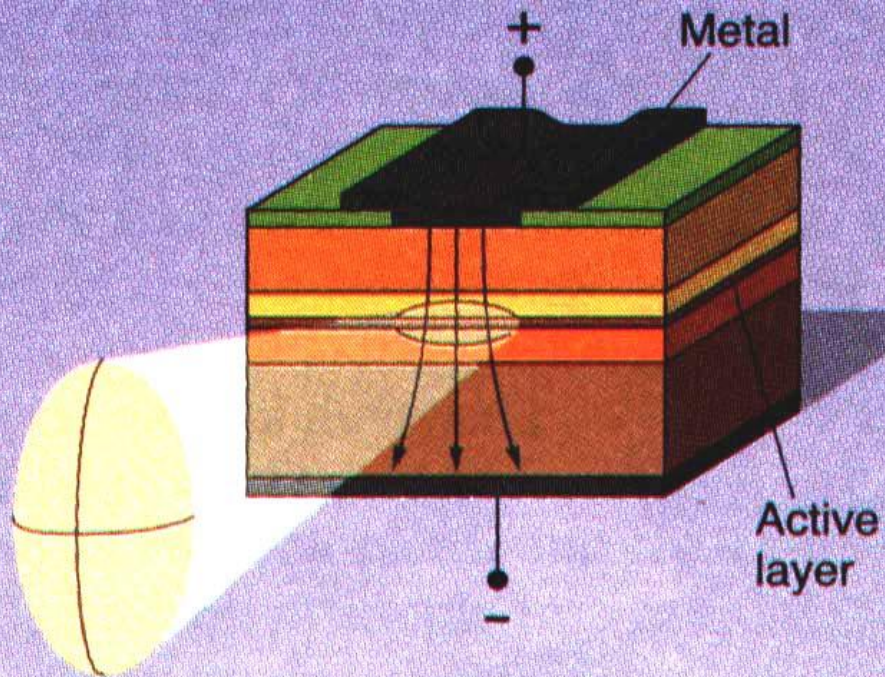
# Волноводные свойства гетероструктур



Полупроводниковый лазер и его волновод.

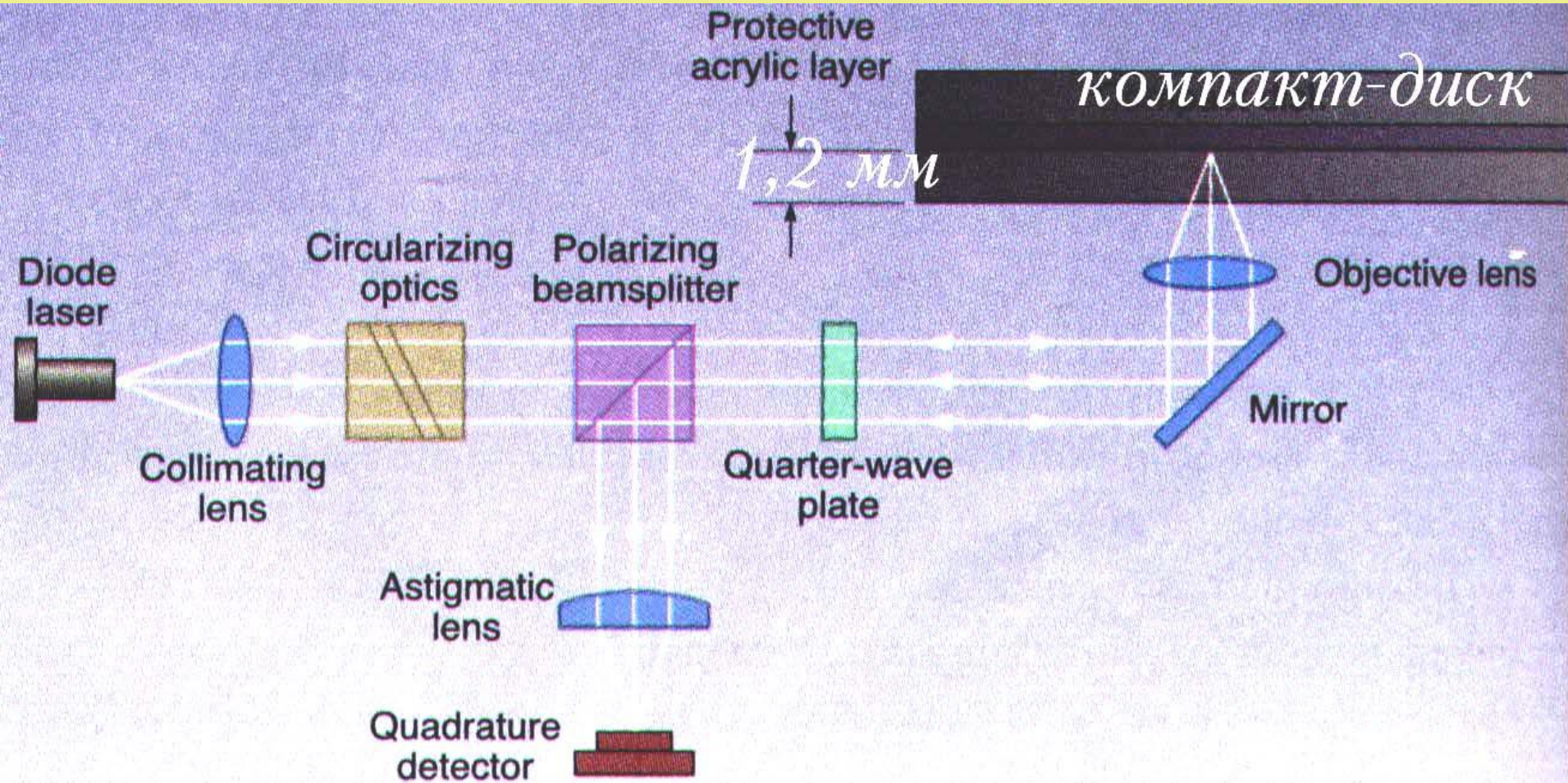


а — поперечное сечение полупроводникового лазера, удерживающего излучение в боковом направлении благодаря специальному профилю показателя преломления (встроенный волновод); б — лазер с волноводным эффектом в плоскости  $p-n$ -перехода, который обусловлен направляющим эффектом усиления.



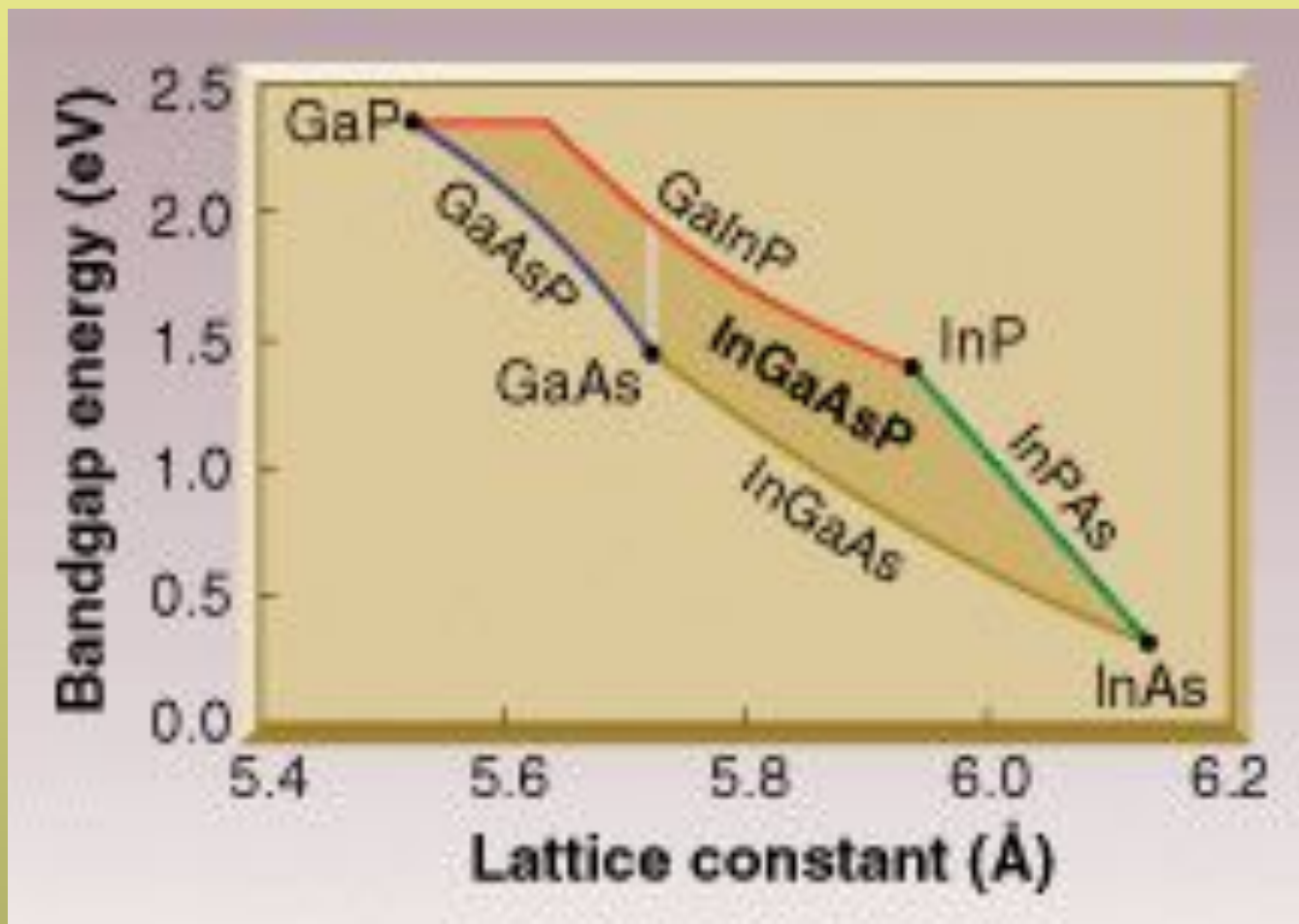


# Оптическая схема считывания информации в CD-ROM

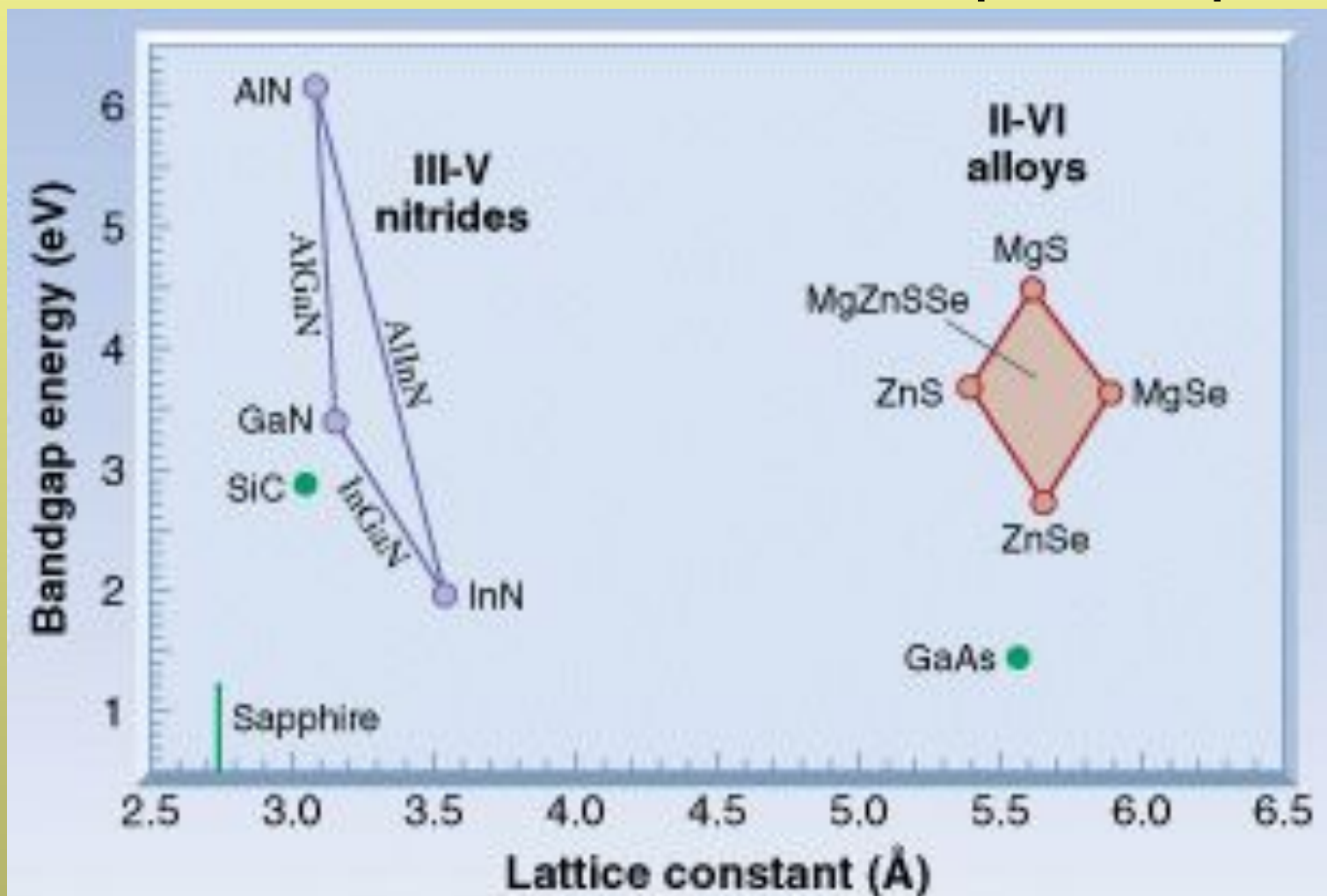




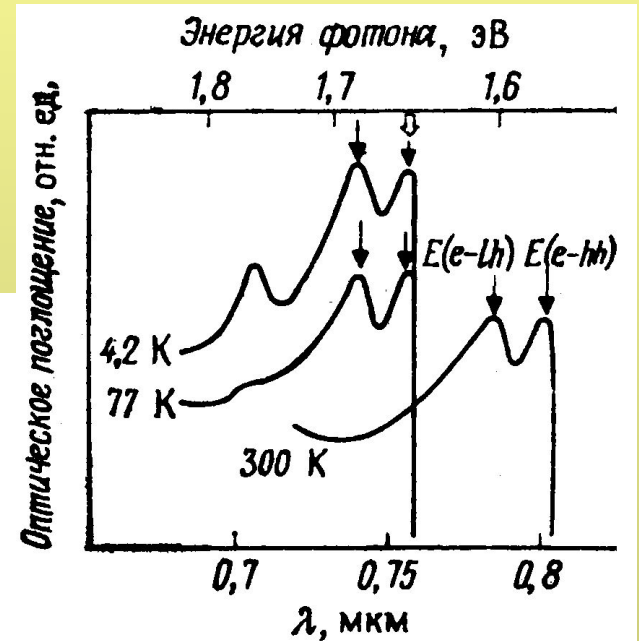
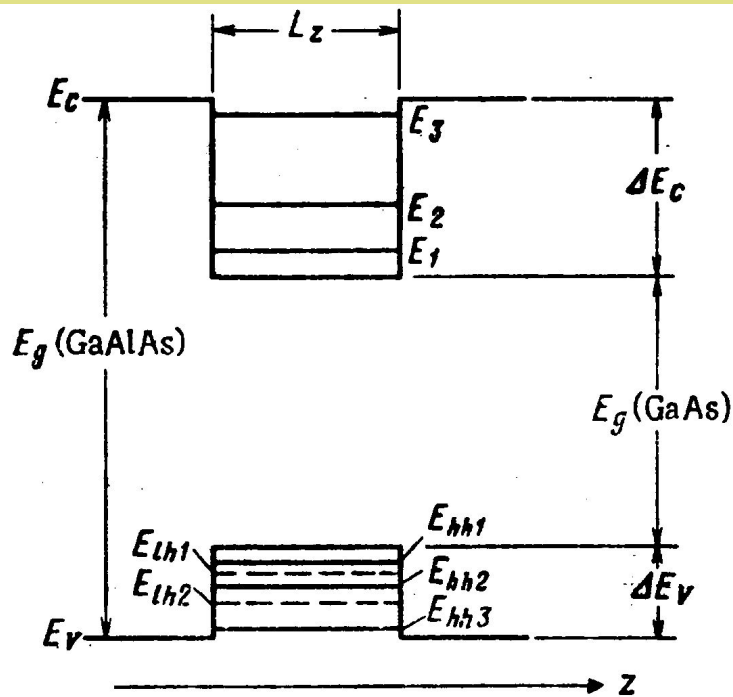
# Зависимость энергии запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки двойных соединений и их растворов



# Зависимость энергии запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки двойных соединений и их растворов



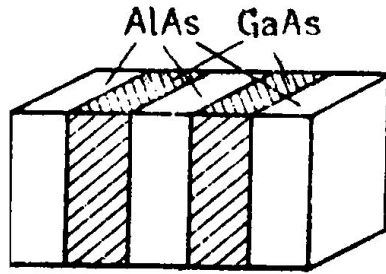
# Квантово-размерная структура



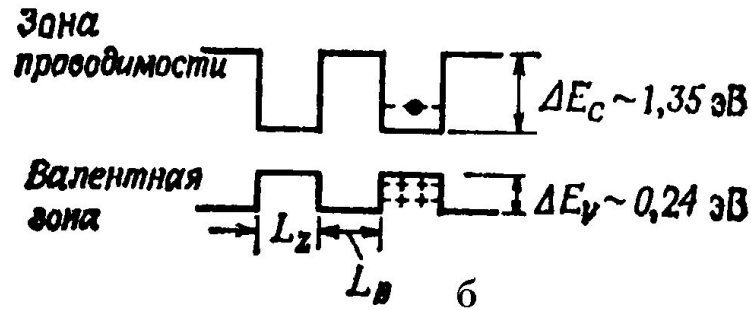
Спектры оптического поглощения в сверхрешетке структуры GaAs — AlAs при различных температурах ( $L_z = 54 \text{ \AA}$ ; нелегированная; для удобства наблюдения спектры параллельно смещены по оси ординат).

Диаграмма энергетических уровней КРС на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

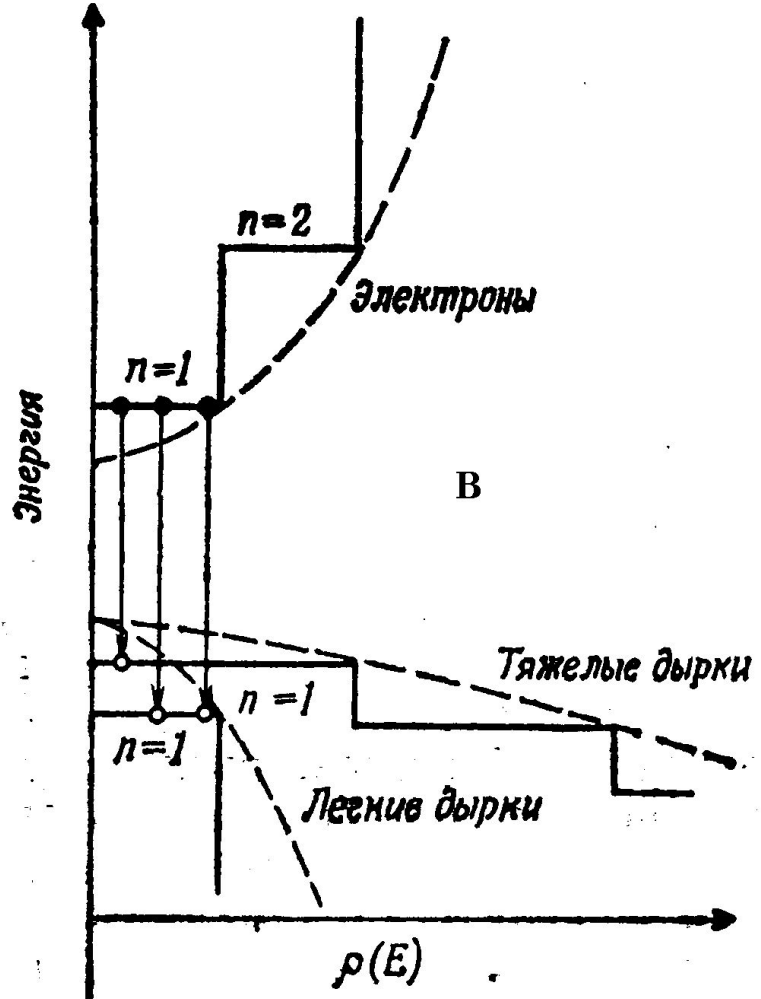
# Многослойная КРС

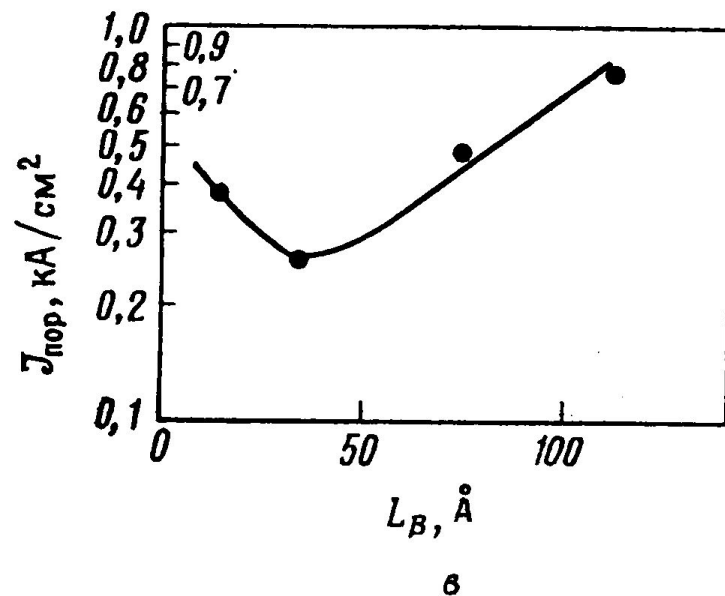
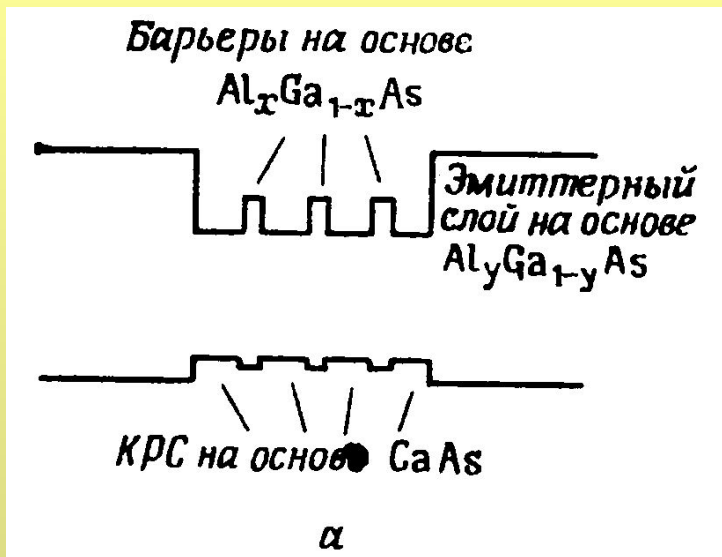


а

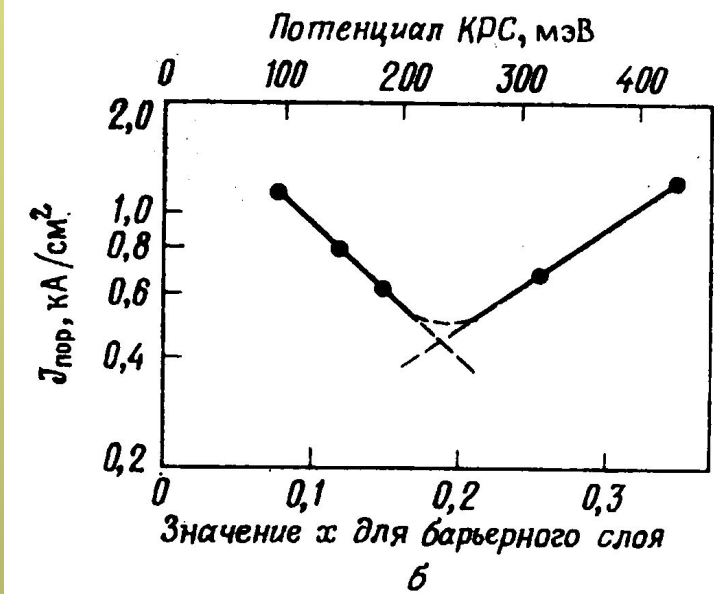


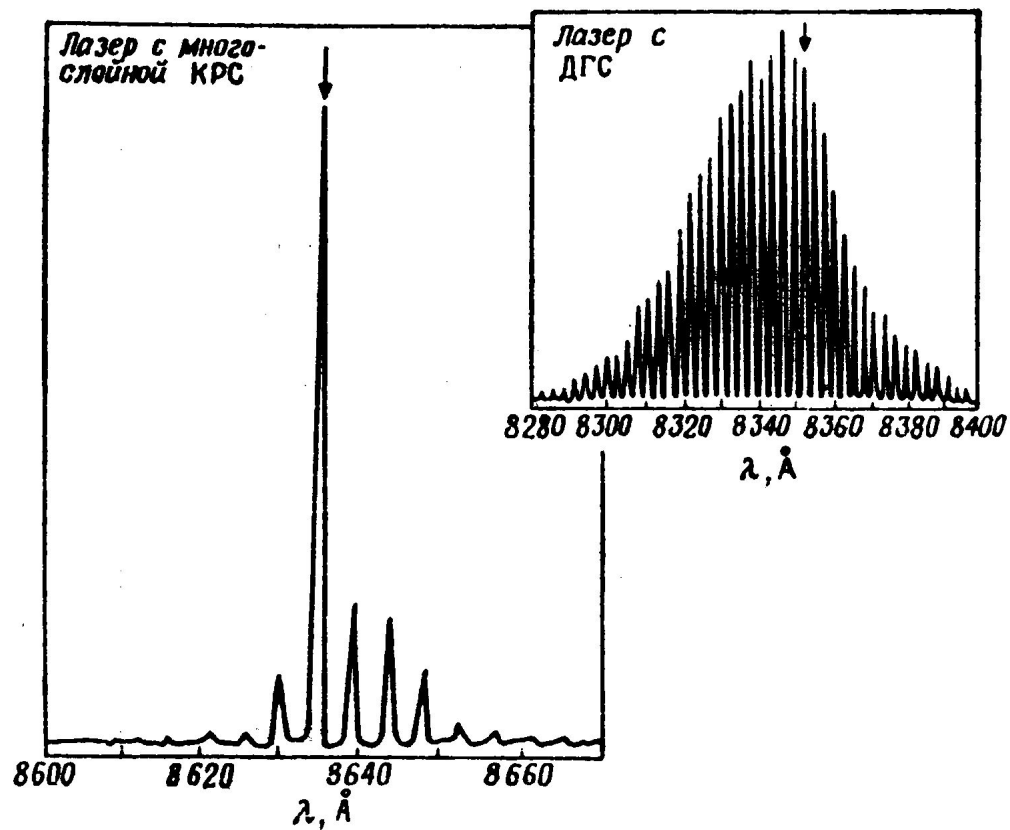
а — модель сверхрешетки на основе GaAs — AlAs; б — зонная структура в сверхрешетке; в — энергетическая диаграмма в сверхрешетке. (Штриховые кривые соответствуют зонам для объемного кристалла GaAs.)





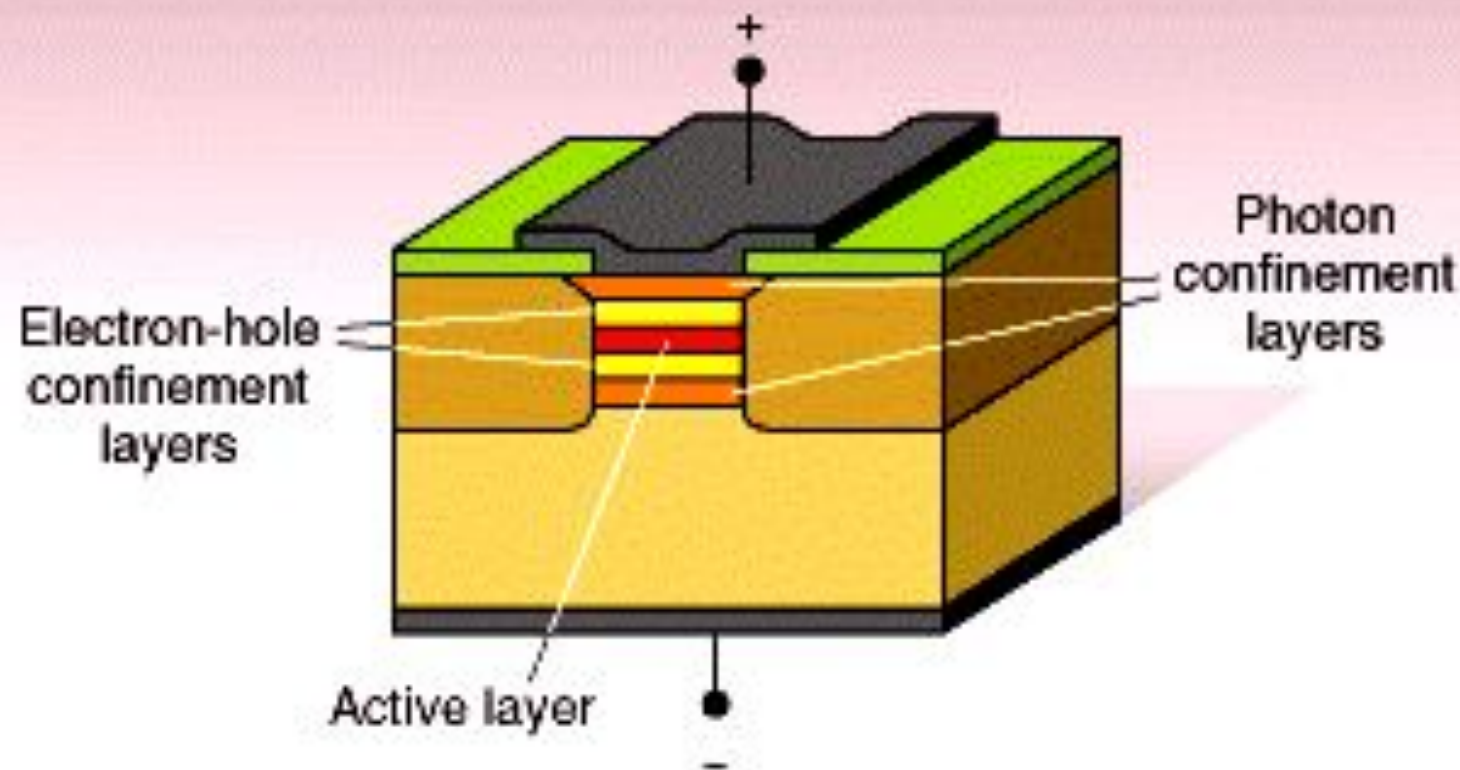
Модель лазера с модифицированной многослойной квантово-размерной структурой (а), зависимость плотности порогового тока от стехиометрического коэффициента  $x$  барьерного слоя (б) и толщины барьерного слоя в  $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  (в). (В эмиттерном слое  $y = 0,3-0,36$ )





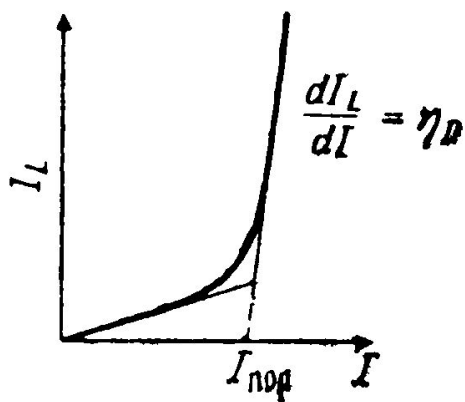
Сравнение модуляционных характеристик многослойного квантово-размерного лазера и обычного лазера с двойной гетероструктурой (ДГС).



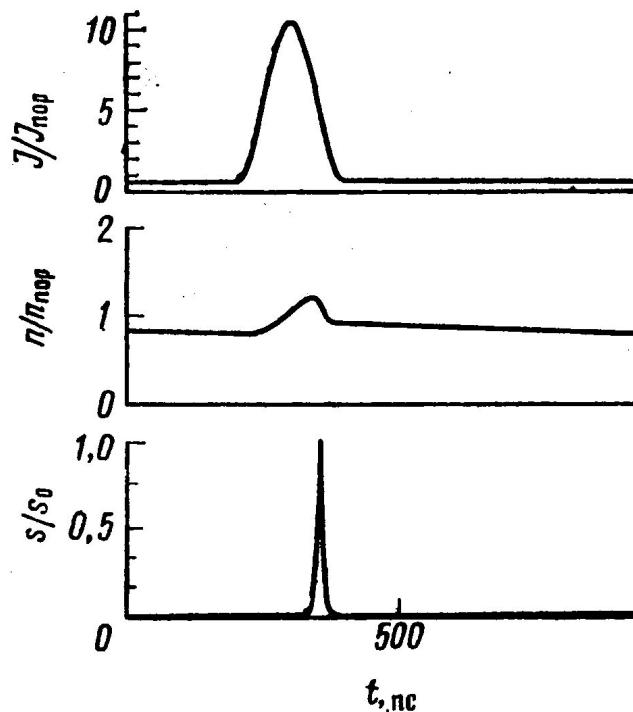


Quantum-well structure of an early gallium indium phosphide visible-output laser diode includes an active layer of less than 20-nm thickness (the layers are not drawn to scale). Aluminum was mixed with gallium indium to form the confining layers.

# Генерация сверхкоротких импульсов



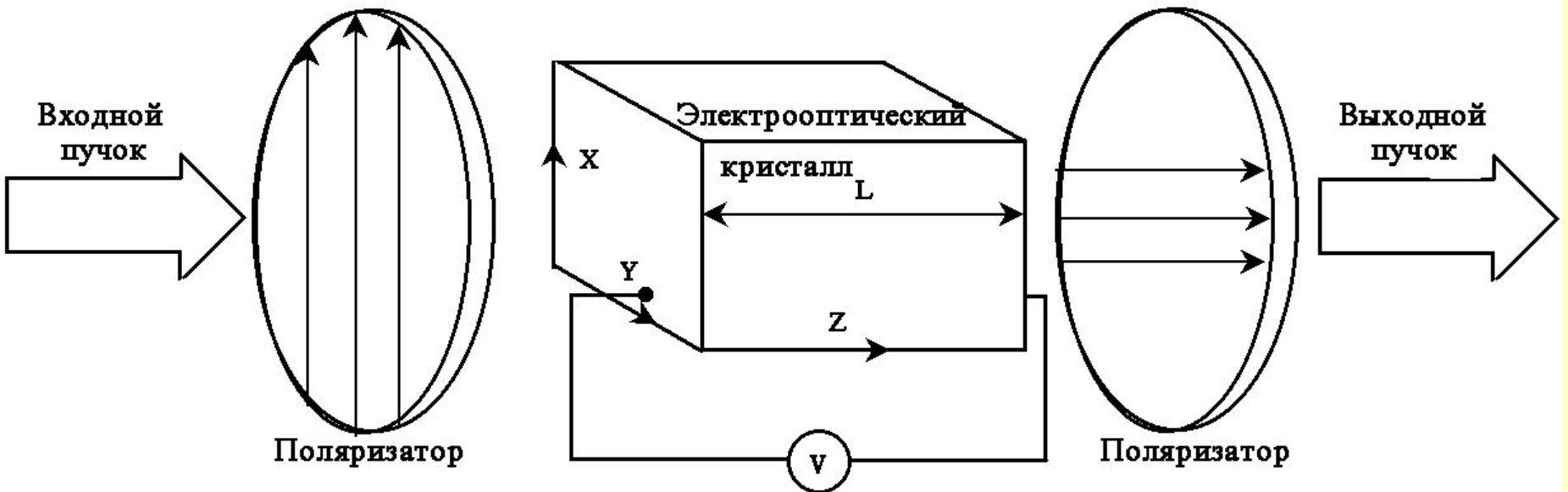
Зависимость интенсивности излучения от тока (к определению дифференциального квантового выхода).  $\eta_Q = (I_L/h\nu)/(I/e) = (e/h\nu)\eta_D$ .



Образование сверхкороткого импульса вследствие нелинейности при возбуждении полупроводникового лазера коротким импульсом тока. Ширина импульса тока 100 пс, ширина оптического импульса 10 пс.  $J$  — плотность тока,  $n$  — концентрация носителей,  $s$  — концентрация фотонов.

# Электрооптические модуляторы света

## Ячейка Поккельса



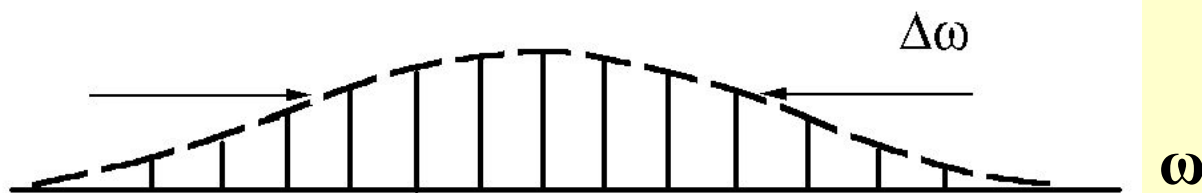
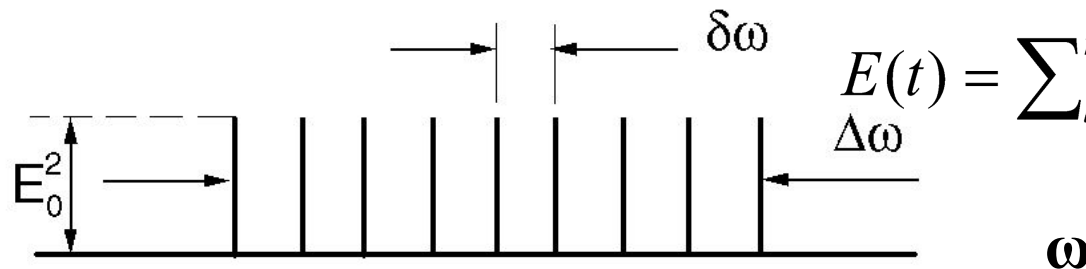
$$\Delta n_X = -\frac{1}{2} r_{13} n_0 E_Z$$

$$\delta\varphi = 2\pi (\Delta n_X - \Delta n_Y) \frac{L}{\lambda}$$

$$\Delta n_Y = -\frac{1}{2} r_{33} n_e E_Z$$

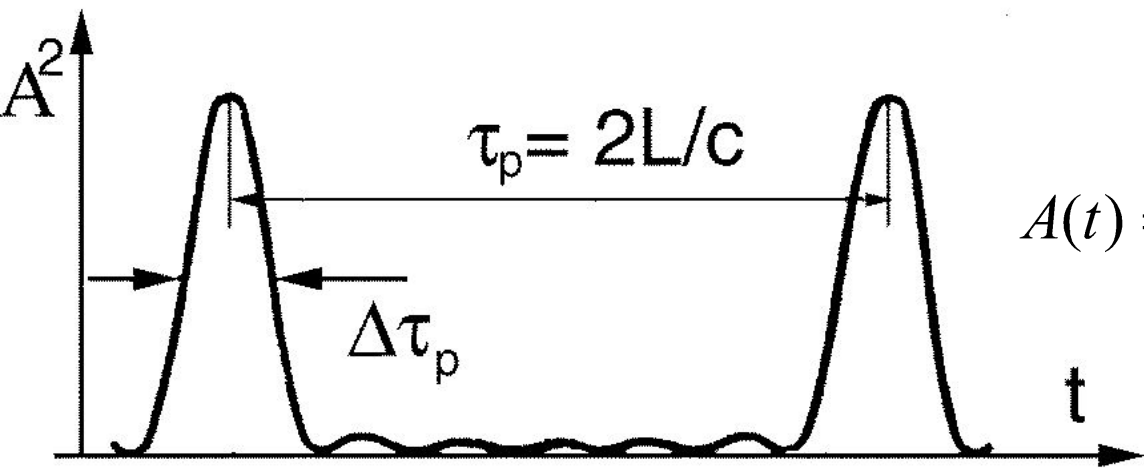
Минимальное время переключения  $\sim 1$  пс

# Синхронизация продольных мод в резонаторе



$$\Delta\omega = \frac{\pi c}{L}$$

$$\varphi = \varphi_l - \varphi_{l-1}$$

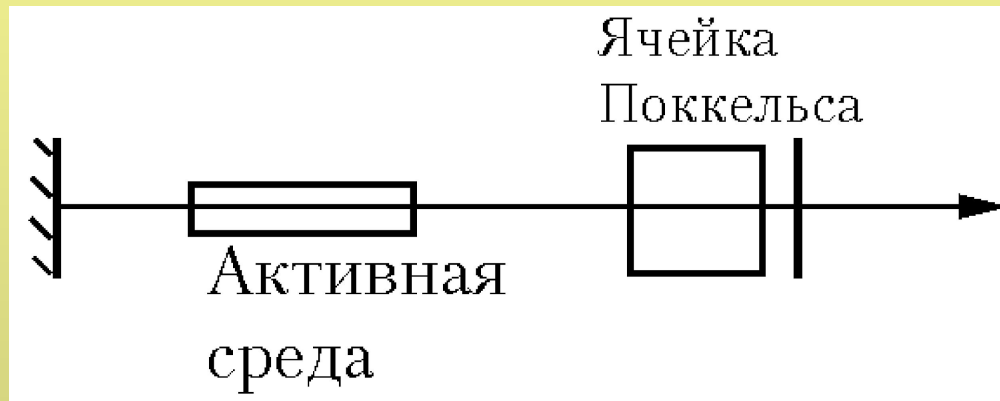
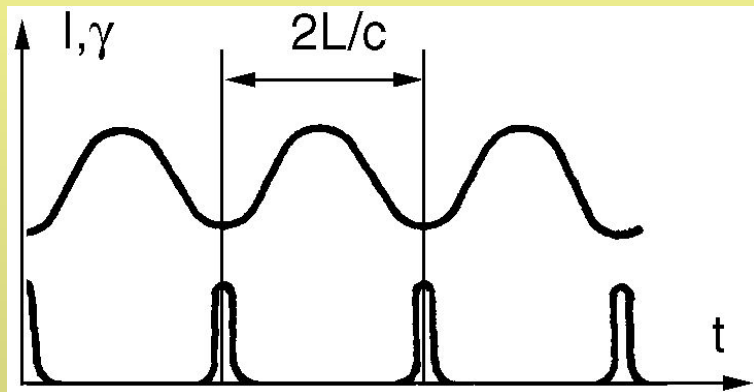


$$A(t) = E_0 \frac{\sin[(2n-1)(\Delta\omega t + \varphi)/2]}{\sin[(\Delta\omega t + \varphi)/2]}$$

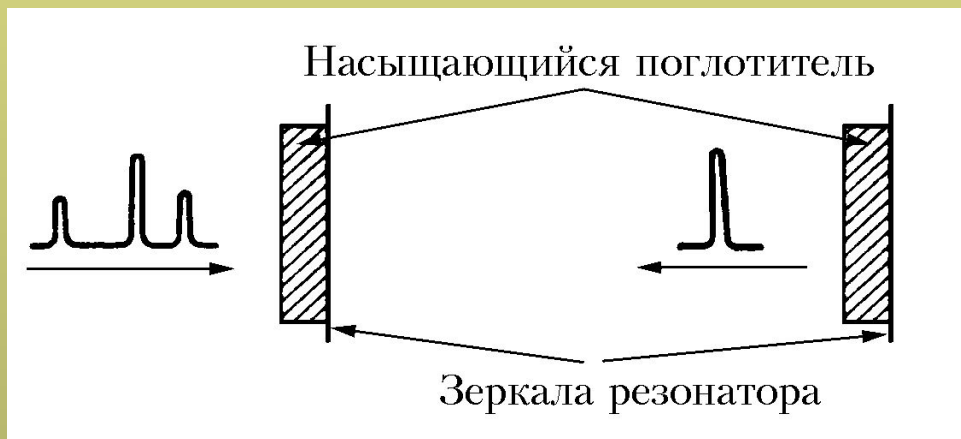
$$\Delta\tau_p \approx \frac{2\pi}{(2n+1)\Delta\omega}$$

# Методы синхронизации мод

## Активная синхронизация мод



## Пассивная синхронизация мод



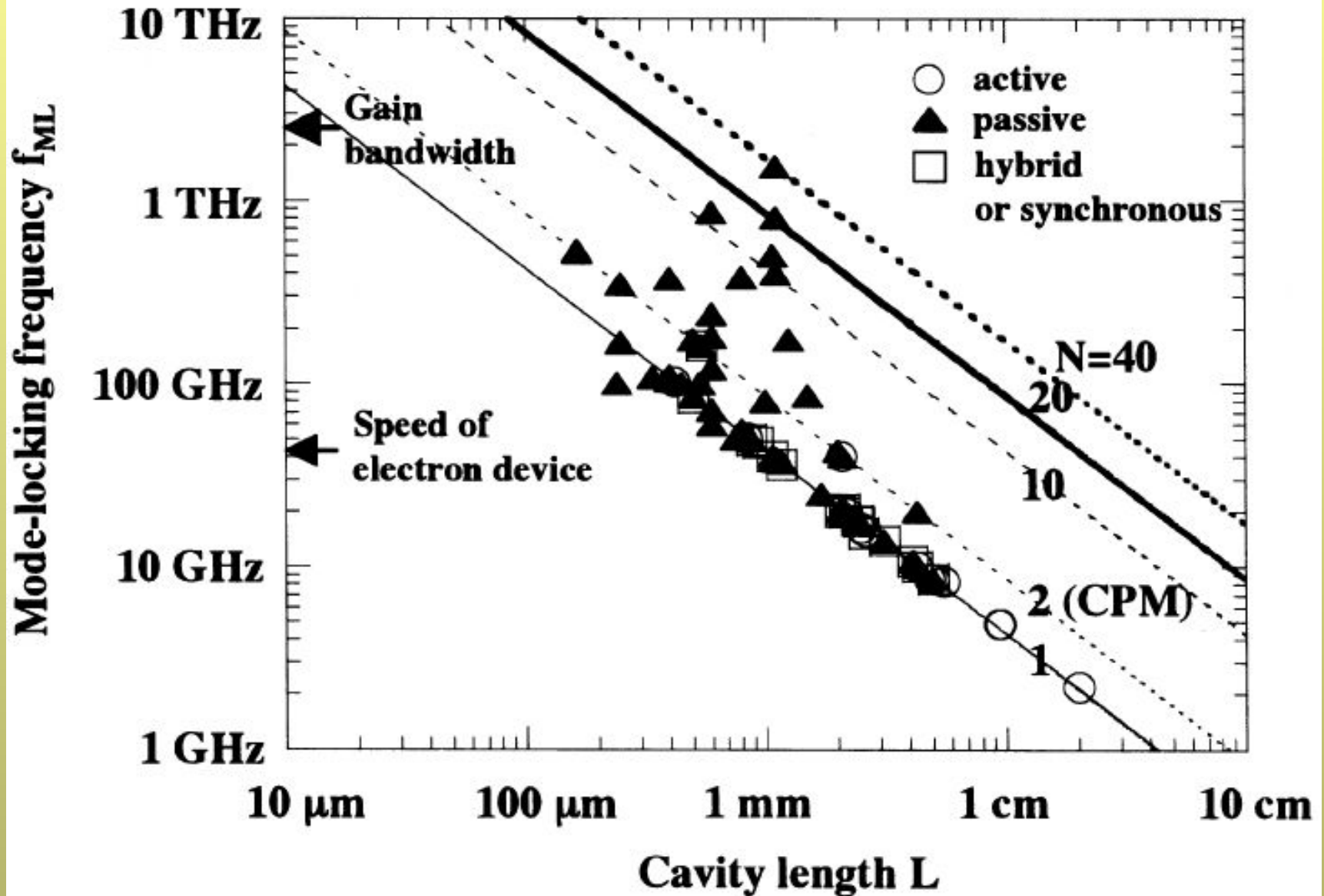
# Методы генерации сверхкоротких импульсов

	Способ генерации	Длительность импульса эксперимент (теория)	Особенности
Модуляция добротности	Активная	— ( $\sim 10$ пс)	Большая максимальная выходная мощность; трудности в изготовлении элементов *; трудности в управлении работой элементов **
	Пассивная	20—100 пс ( $\sim 10$ пс)	
Модуляция усиления	Сильная гармоническая модуляция; возбуждение коротких импульсов тока	10—100 пс ( $\sim 10$ пс) 10—30 пс/ ( $\sim 10$ пс)	Простота и удобство; легкость реализации; позволяет менять частоту повторения импульсов
Синхронизация мод	Активная	10 пс — 30 пс/ /( $\sim 0,1$ пс)	Когерентность импульсов; необходимость внешнего резонатора; длительность импульсов близка к теоретическому пределу **
	Пассивная	0,6 пс — 30 пс/ /( $\sim 0,1$ пс)	

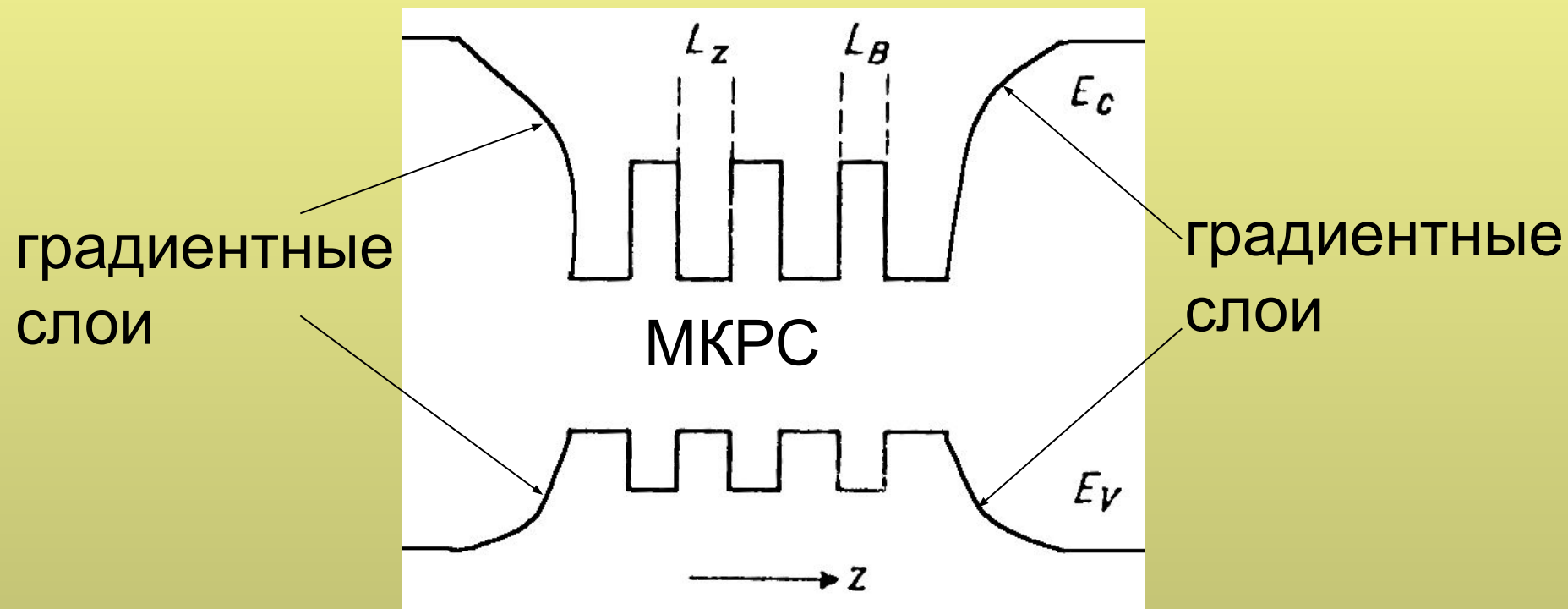
\* Главным образом в активном режиме. \*\* Главным образом в пассивном режиме.



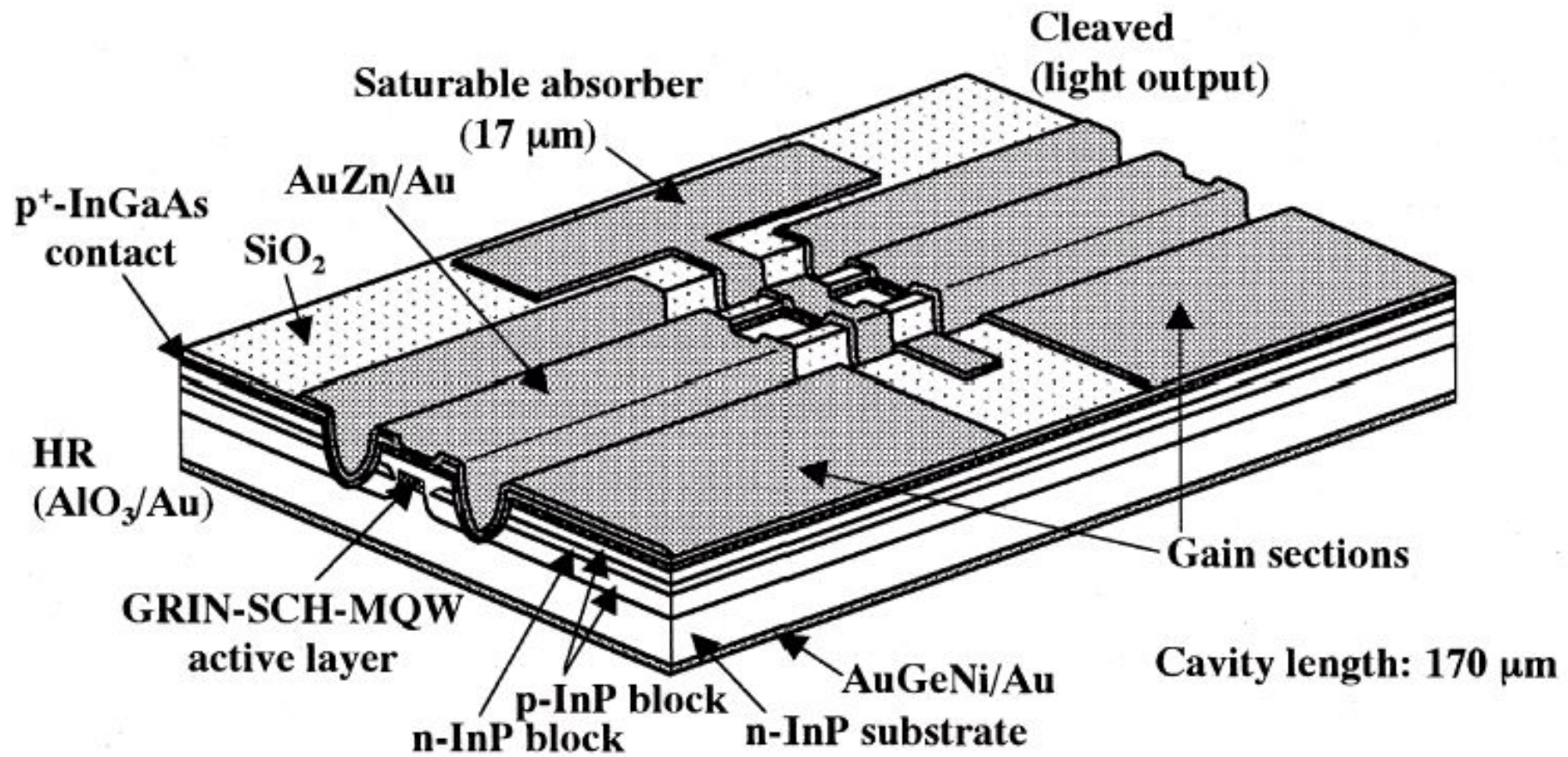
# Частота синхронизации мод в современных полупроводниковых лазерах



# Структура лазера типа GRIN-SCH с многослойной квантоворазмерной структурой

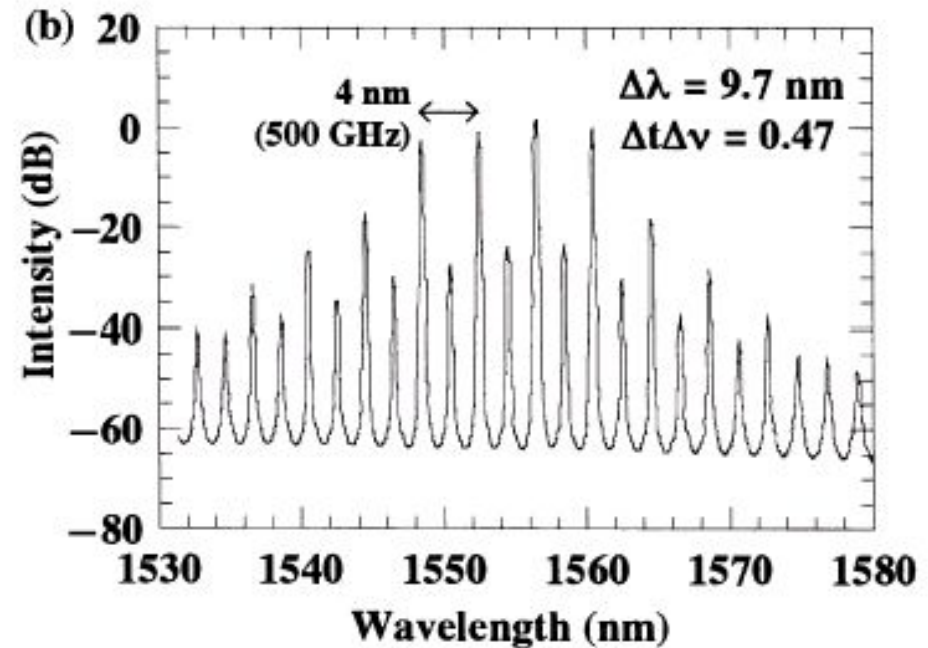
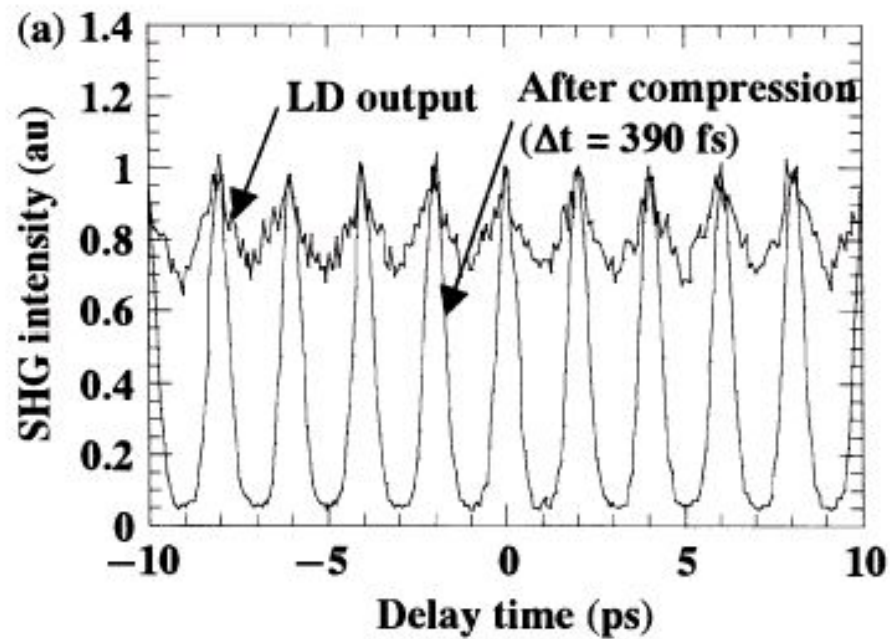


graded-index separated confinement heterostructure  
colliding-pulse mode-locked LD (CPM-LD)

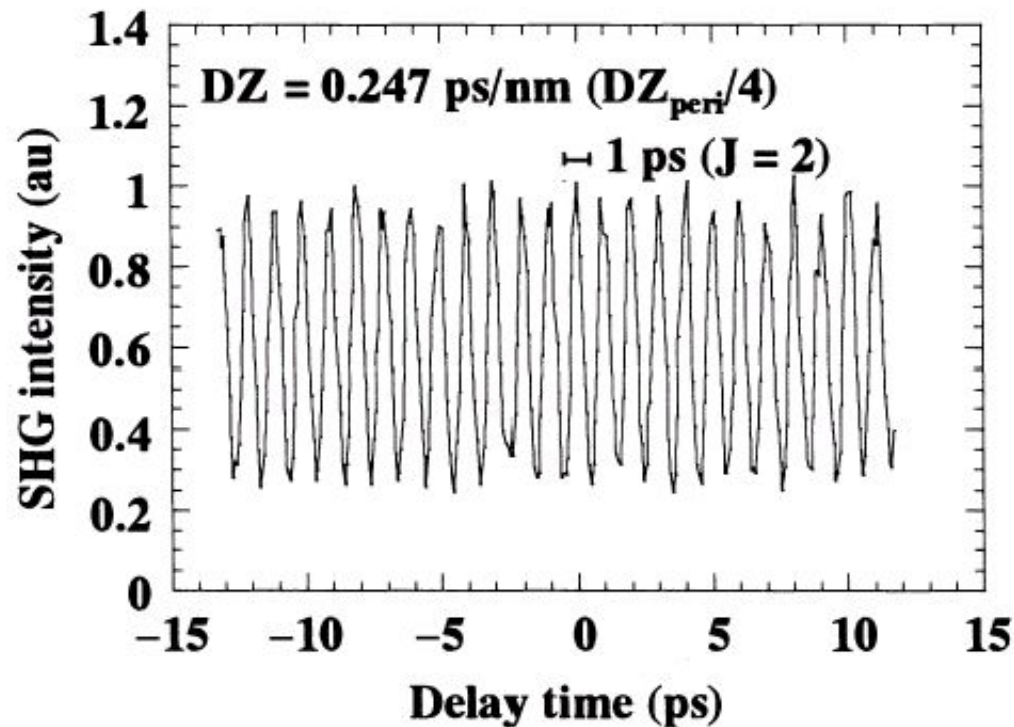


Device structure of a short-cavity GRIN-SCH-MQW CPM-LD.

# Экспериментальные данные по получению цуга фемтосекундных импульсов в полупроводниковом лазере с синхронизацией мод (GRIN-SCH-MQW-CPM)



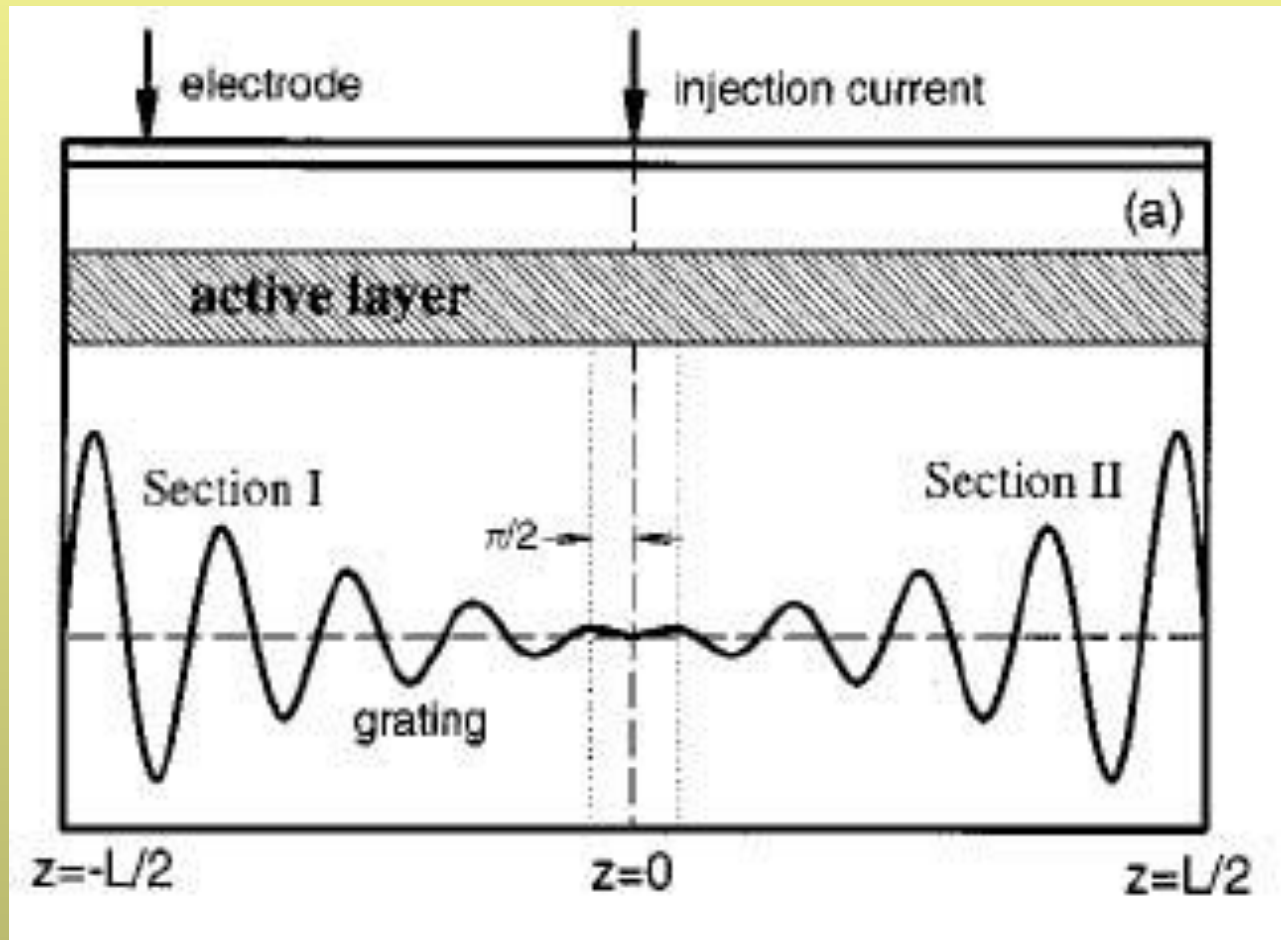
# Временной цуг импульсов GRIN-SCH-MQW-CPM лазера с частотой 1 ТГц



SHG correlation trace of 1 THz optical pulse train obtained by two-times multiplication of a 500-GHz CPM-LD.

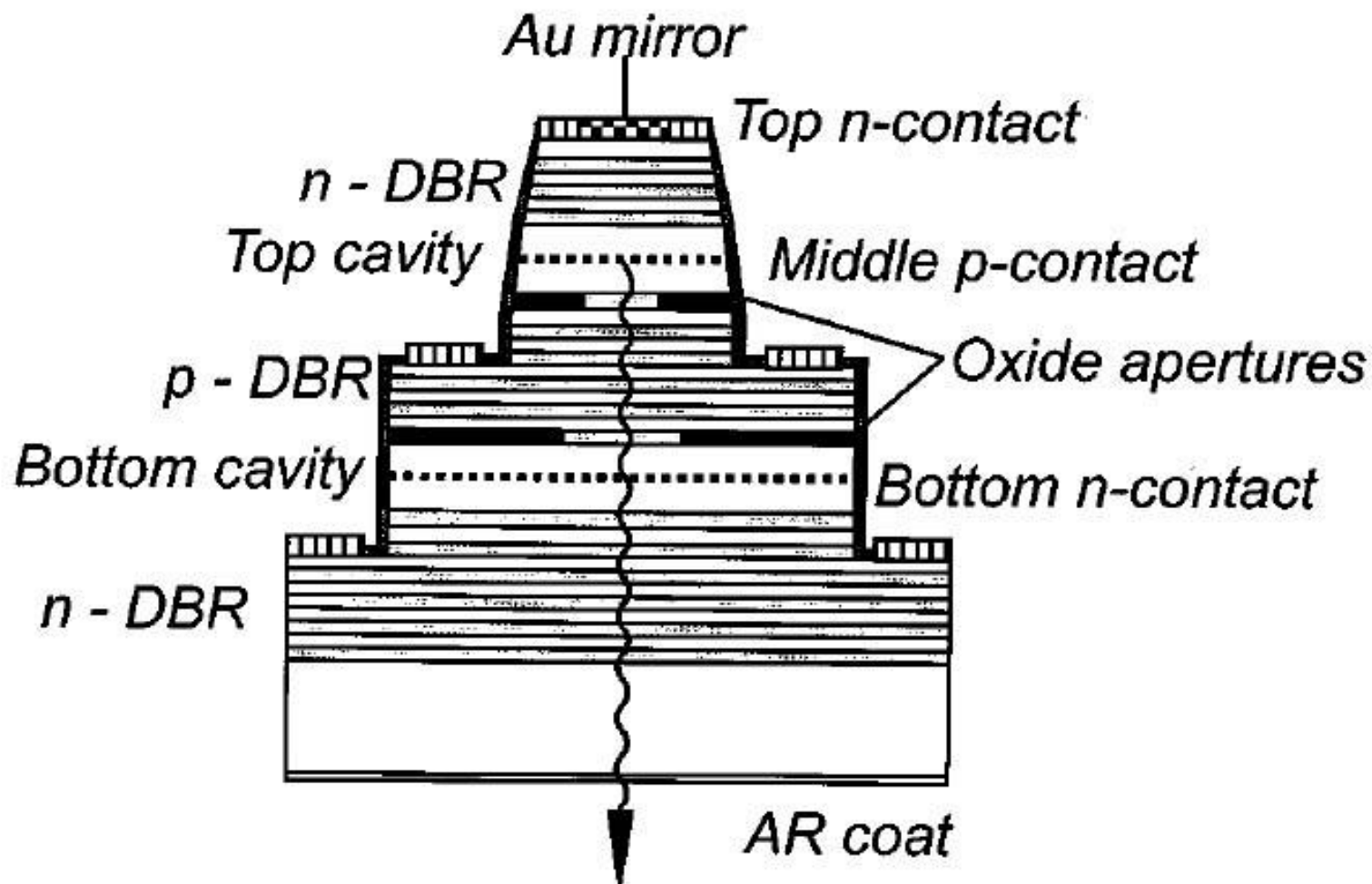


# Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью

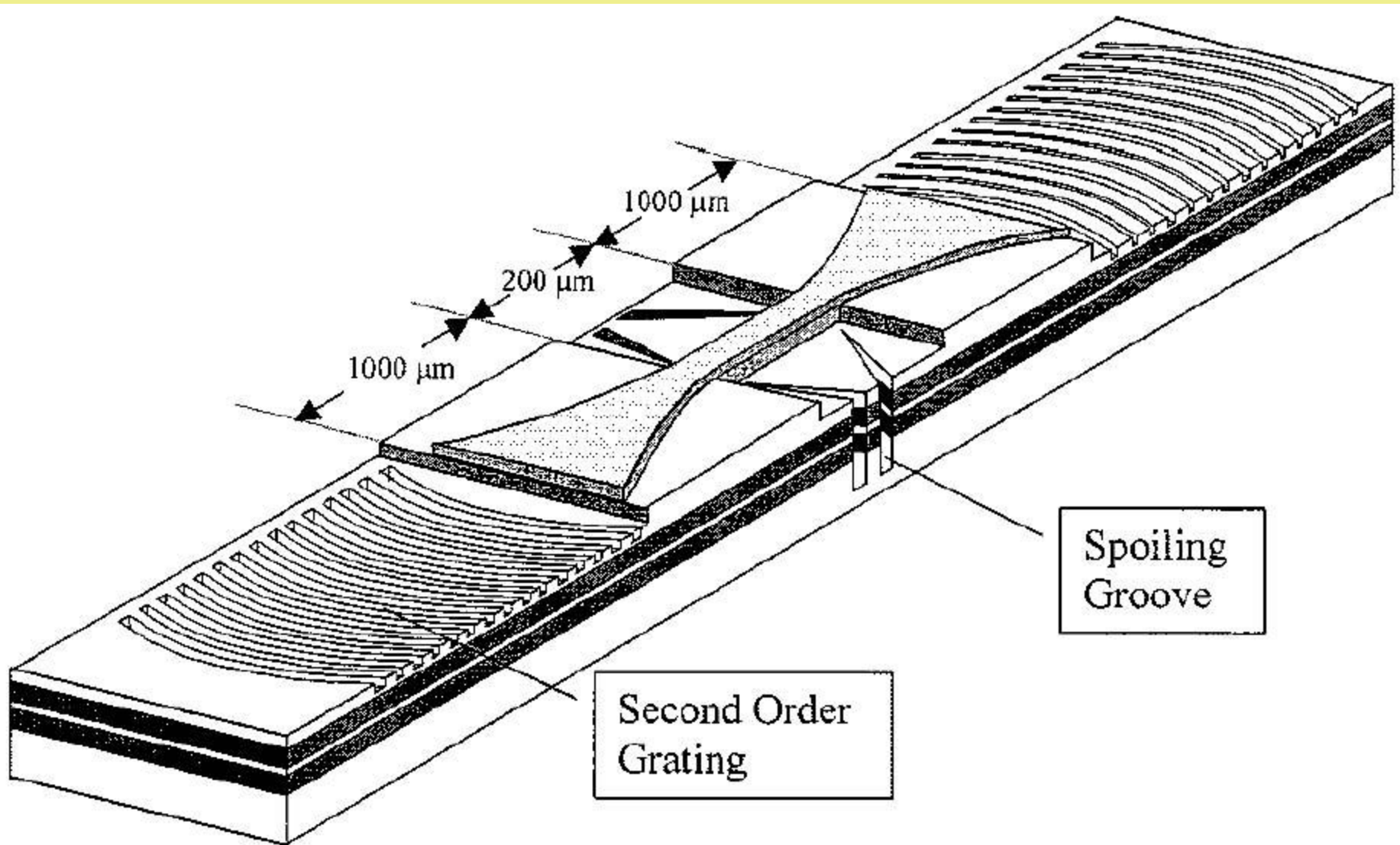


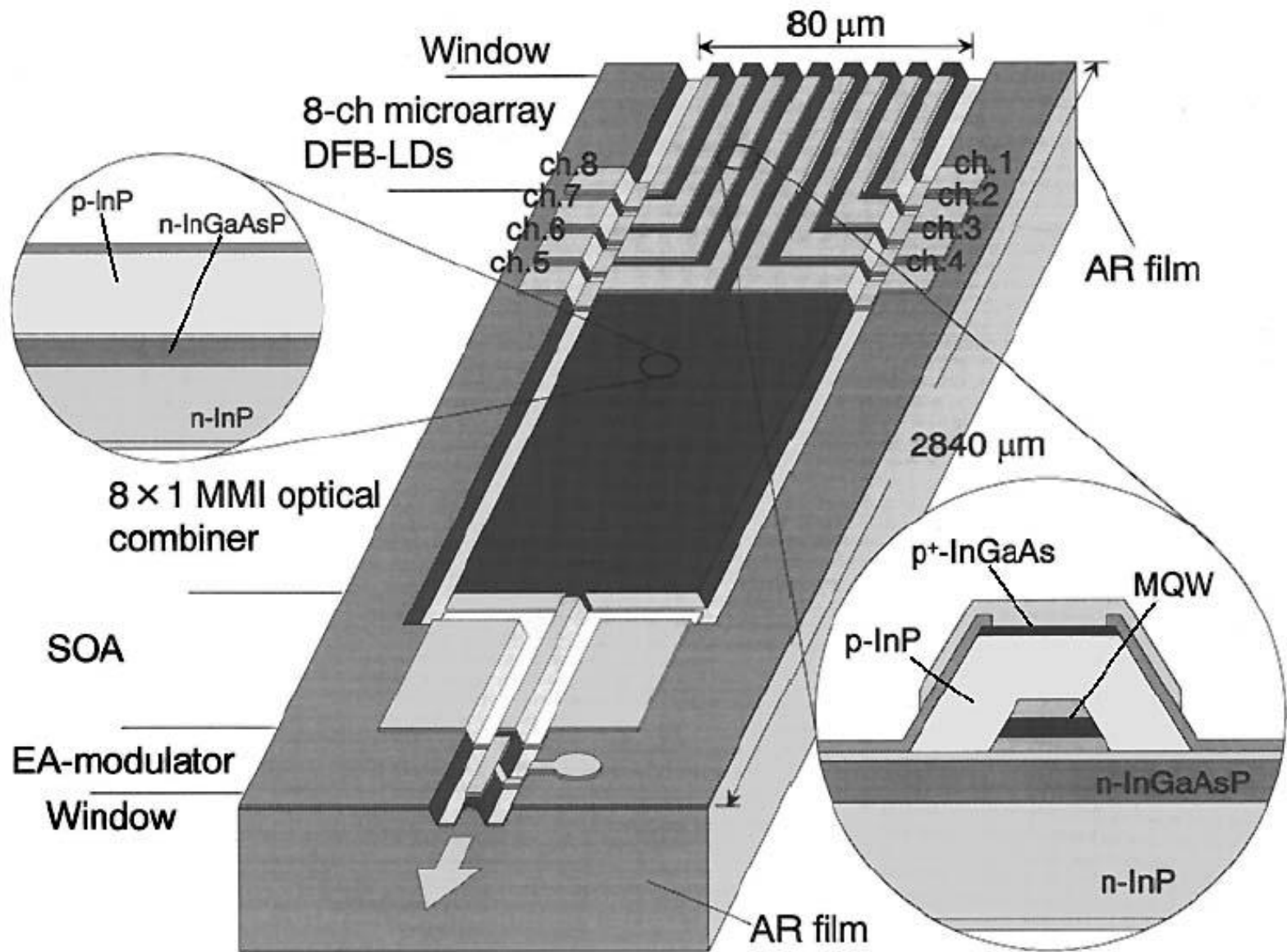


# Вертикально-излучающий полупроводниковый лазер на двух длинах волн с брэгговскими зеркалами (DBR)



# Вертикально-излучающий полупроводниковый лазер с брэгговскими зеркалами





Schematic structure of the wavelength-selectable eight-stripe microarray DFB-LD's with monolithically integrated MMI, SOA, and MOD.

# Литература

- О.Звелто. Принципы лазеров.-М.:Мир, 1984
- Физика полупроводниковых лазеров.- М.:Мир, 1989
- Laser Focus World, 2000, Vol. 36, No. 4, 5, 6, 7  
Semiconductor Lasers 2000.  
[www.optoelectronics-world.com](http://www.optoelectronics-world.com)